

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

53+523

**КАКИЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ И АСТРОФИЗИКИ  
ПРЕДСТАВЛЯЮТСЯ СЕЙЧАС ОСОБЕННО ВАЖНЫМИ  
И ИНТЕРЕСНЫМИ?***В. Л. Гинзбург*

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение . . . . .	87
I. Макрофизика . . . . .	89
1. Управляемый термоядерный синтез . . . . .	89
2. Высокотемпературная сверхпроводимость . . . . .	90
3. Новые вещества (металлический водород, аномальная вода и т. п.) . . . . .	92
4. Металлическая экситонная (электронно-дырочная) жидкость в полупроводниках . . . . .	94
5. Фазовые переходы второго рода (критические явления) . . . . .	95
6. Сверхтяжелые элементы (далекие трансураны) . . . . .	97
II. Микрофизика . . . . .	98
7. Введение . . . . .	98
8. Спектр масс (третья спектроскопия) . . . . .	100
9. Фундаментальная длина (квантованное пространство и т. п.) . . . . .	101
10. Взаимодействие частиц при высоких и сверхвысоких энергиях . . . . .	102
11. Нарушение <i>CP</i> -инвариантности . . . . .	103
12. О микрофизике вчера, сегодня и завтра . . . . .	104
III. Астрофизика . . . . .	106
13. Экспериментальная проверка общей теории относительности . . . . .	106
14. Гравитационные волны . . . . .	108
15. Космологическая проблема. О сингулярностях в общей теории относительности и космологии . . . . .	109
16. Квазары и ядра галактик . . . . .	111
17. Нейтронные звезды и пульсары . . . . .	112
18. Происхождение космических лучей и космического гамма- и рентгеновского излучения . . . . .	113
19. Нейтринная астрономия . . . . .	115
20. Несколько замечаний о развитии астрономии . . . . .	116
IV. Заключение . . . . .	117
Цитированная литература . . . . .	118

## ВВЕДЕНИЕ

Физики и астрофизики заняты в настоящее время изучением огромного количества различных вопросов. В подавляющем большинстве случаев речь идет о вполне разумных задачах, о попытках если и не разгадать загадки природы, то все же узнать нечто новое. О любых таких вопросах трудно сказать, что они не интересны или не важны. Да и вообще нелегко сколько-нибудь последовательным образом определить, что значит «не важно» и (или) «не интересно» в науке. Вместе с тем иерархия проблем и задач фактически, безусловно, существует. Она действует на

практике, отражается на всей научной (а иногда и не только научной) жизни и видна даже из оглавления журналов. Часто выделение «особенно важных физических проблем» происходит в силу их потенциального технического или экономического эффекта, иногда это связано с особой загадочностью вопроса, но лишь другой раз является данью моде или осуществляется под действием каких-то непонятных или случайных факторов.

Составление списков «важнейших проблем» и комментариев к ним уже не раз предпринималось. В таких случаях обычно созываются совещания или создаются специальные комиссии, которые заседают (с целью «подавления помех» они иной раз даже выезжают в дома отдыха) и порождают довольно объемистые документы. Не берусь делать обобщений, но могу констатировать, что не видел, чтобы эти записки о важнейших проблемах кто-либо читал с большим интересом. Видимо, специалистам в них нет особой нужды, а представителям более широкой «публики» они не кажутся привлекательными.

Между тем может ли начинающих физиков и астрономов, да и не только их, не интересовать простой вопрос: где сейчас «горячо» в физике и астрофизике? Или, другими словами, какие проблемы физики и астрофизики представляются в данный момент особенно важными и интересными? Исходя из предположения, что такие вопросы действительно интересуют по крайней мере студентов-физиков, я попытался ответить на них в лекции \*), обработанный текст которой предлагается вниманию читателей. Таким образом, это не плод работы комиссии и даже не результат каких-либо специальных разысканий, как выражаются литературоведы.

Ниже перечисляются проблемы, которые мне кажутся сейчас относящимися к категории особенно важных и интересных, но без того, чтобы точно определять как сами эти понятия, так и мотивировать характер отбора. Каждый в праве иметь свое собственное мнение на этот счет и ни с кем не обязан его «согласовывать» до тех пор, пока не делается какой-либо попытки объявить это мнение апробированным или лучшим, чем другие возможные суждения. Никаких таких попыток, не говоря уже о предложениях организационного типа, я заведомо не предпринимаю и, желая подчеркнуть «личный» характер изложения, не стремился даже, как это принято в научной литературе, избегать употребления местоимений я, мне и т. п.

Было бы любопытно, а быть может, и полезно, сравнить списки «важнейших проблем физики и астрофизики», составленные разными лицами. К сожалению, соответствующие опросы научного общественного мнения, насколько известно, не производились. Поэтому могу лишь высказать предположение, что в большинстве таких списков было бы очень много общего, если бы только удалось, а это нелегко, договориться об одном: что называть «физической проблемой», в отличие, скажем, от областей, направлений или объектов физических исследований. Опять же, не углубляясь в дефиниции, замечу, что называю проблемой такой вопрос. характер (содержание) ответа на который остается в значительной мере неясным. Речь должна идти не о технических разработках, необходимости провести ряд измерений и т. п., а о самой возможности создать какое-то вещество с необычными свойствами (например, высокотемпературный сверхпроводник), выяснить вопрос о границах применимости теории

\*) Кафедра проблем физики и астрофизики Московского физико-технического института ежегодно предлагает вниманию студентов старших курсов небольшой цикл из 8—10 лекций, посвященных различным актуальным вопросам физики и астрофизики. Лекция, положенная в основу настоящей статьи, была прочитана 17 сентября 1970 г. и явилась введением к упомянутому циклу.

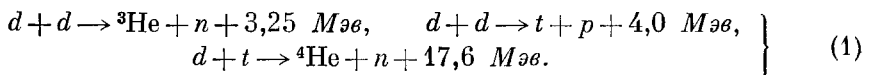
(например, общей теории относительности), раскрыть какую-то подлинную тайну (скажем, понять причину нарушения комбинированной четности при распаде  $K$ -мезонов). Исходя именно из таких соображений, ниже не упоминаются квантовая электроника (включая большинство применений лазеров, не говоря уже о развитии самой лазерной техники), многие задачи исследования полупроводников (включая задачу миниатюризации схем и приборов), нелинейная оптика и голография, а также ряд других интересных направлений современной оптики, задачи вычислительной техники (включая вопрос о создании вычислительных машин нового типа) и многое другое. Большое значение всех упомянутых направлений, обилие различных не только технических, но и физических вопросов, с ними связанных (см., например,<sup>1)</sup>, не вызывают никаких сомнений. Но принципиальной «физической проблемы» или, если угодно, какой-то существенной «неопределенности», касающейся физики дела, я в этих вопросах в настоящее время не вижу. До создания, скажем, первого лазера, такая неопределенность все же существовала, хотя принципы, положенные впоследствии в основу конструкции лазера, и были ясны. Повышение же мощности или изменение других параметров лазера, как и любого другого прибора, это дело нужное, трудное и почтенное, но явно качественно отличное от задачи создания совершенно нового прибора \*).

Субъективная окраска и спорность этих замечаний очевидны, но об этом читатели уже были предупреждены — таков характер статьи (другое дело, что никакие предупреждения и оговорки обычно не помогают). Прежде, чем перейти, наконец, к содержанию статьи, остается отметить, что деление ее на три части (макрофизика, микрофизика, астрофизика) также в достаточной мере условно. Так, проблема сверхтяжелых ядер считается макрофизической, хотя ее можно было бы считать микрофизической. Аналогично, вопросы общей теории относительности отнесены к астрофизике, а не к макрофизике, лишь в силу того, что общая теория относительности используется в основном в астрономии (мы уже не говорим о том, что различие между астрофизикой и, скажем, макрофизикой, по сути дела, носит иной характер, чем разделение физики на микро- и макрофизику). Подчеркнем, наконец, что ниже мы совсем не касаемся биофизики, не говоря уже о менее важных смежных с физикой научных направлениях.

## I. МАКРОФИЗИКА

### 1. Управляемый термоядерный синтез

Проблема управляемого термоядерного синтеза будет считаться решенной, если удастся использовать для нужд энергетики ядерные реакции синтеза. Основные реакции, о которых идет речь, таковы ( $d$  и  $t$  — ядра дейтерия и трития,  $p$  — протон,  $n$  — нейтрон):



Роль могут играть также некоторые другие реакции, из которых особо отметим реакцию  ${}^6\text{Li} + n \rightarrow t + {}^4\text{He}$ , позволяющую использовать нейтроны и в то же время регенерировать тритий.

\*) Сказанное, конечно, не относится к осуществлению рентгеновских и гамма-аналогов лазера — их можно было бы назвать соответственно разером и газером. Проблему создания разеров и газеров следовало бы включить в наш «список», но мы ограничимся ее упоминанием в настоящем примечании. Примером еще одной проблемы, не упоминаемой ниже лишь по более или менее случайным обстоятельствам, является выяснение природы шаровой молнии и ее создание в лаборатории.

В том, что энергию ядерного синтеза каким-то образом удастся использовать, сомневаться трудно — достаточно упомянуть о «тривиальной» возможности применения подземных взрывов. С другой стороны, управляемым синтезом пристально интересуются уже двадцать лет<sup>2</sup>, но контуры будущего термоядерного реактора еще далеко не ясны<sup>3</sup>.

Самым простым, по идее, реактором мог бы явиться плазменный реактор с магнитным удержанием плазмы. Конкретно, наиболее прогрессивными представляются тороидальные магнитные ловушки (токамаки, стеллараторы). Однако и в таких ловушках еще не удалось подавить все виды плазменной неустойчивости, и эффективная теплопроводность на стенки не так уж мала. Поэтому, согласно<sup>3г</sup>, при использовании уже достигнутой степени термоизоляции плазмы для создания самоподдерживающегося реактора (т. е. получения выхода энергии) даже в равнокомпонентной смеси дейтерия и трития и при использовании магнитного поля  $H = 10^5$  э малый радиус тора (в ловушке типа токамак) должен равняться  $a = 14$  м. Если бы даже удалось уменьшить теплопроводность (утечку) еще на два порядка, то было бы  $a = 1,4$  м, но все равно нужно создать колоссальное поле в объемах порядка многих кубометров. Разумеется, если это и можно сделать, то только с использованием сверхпроводящих магнитов (в противном случае, помимо всего прочего, нет оснований ожидать достижения благоприятного энергетического баланса).

Столь исключительные трудности, которые могут оказаться еще большими при переходе к реальным системам, вполне оправдывают обсуждение других подходов к решению задачи. Из литературы известно большое число предложений на этот счет: использование «открытых» магнитных ловушек, применение кратковременного разряда («быстрый пинч»), использование высокочастотного разряда в плазме, нагрев дейтериевых пылинок или пластинок мощными электронными пучками или с помощью излучения лазеров, ускорение пылинок и их использование для разогрева дейтерия и т. п.

Поскольку я сам занимался проблемой термоядерного синтеза лишь в 1950—1951 гг. (см. <sup>2г</sup>), у меня нет оснований для того, чтобы компетентно судить о современном состоянии этой проблемы. Тем не менее позволю себе заметить, что, как и на заре соответствующих исследований, самими привлекательными с точки зрения получения энергии (а не ее потребления!) мне интуитивно кажутся квазистационарные замкнутые магнитные ловушки. Но осуществление управляемого термоядерного синтеза потому-то и должно быть отнесено к числу физических проблем, что пути ее решения недостаточно ясны. Тем самым конкуренция и соревнование различных направлений и предложений естественны и необходимы.

## 2. В ы с о к о т е м п е р а т у р н а я с в е р х п р о в о д и м о с т ь

Сверхпроводимость была открыта в 1911 г. и долгие годы оставалась не только необъясненным явлением (пожалуй, самым загадочным в области макрофизики), но и не находила почти никакого практического применения. Последнее объясняется в первую очередь тем, что сверхпроводимость вплоть до настоящего времени наблюдается только при низких температурах. Так, у первого по времени обнаружения сверхпроводника — ртути критическая температура  $T_c = 4,1^\circ$  К. Наивысшее известное значение  $T_c \approx 21^\circ$  К имеет некоторый сплав Nb, Al и Ge, изученный лишь в самые последние годы (более известно соединение Nb<sub>3</sub>Sn с  $T_c \approx 18,1^\circ$  К, сверхпроводимость которого была обнаружена в 1954 г.). При температурах, близких к  $T_c$  (но, конечно, меньших ее, так как, по определению, при  $T > T_c$  металл перестает быть сверхпроводящим)

использовать сверхпроводник особенно трудно. Достаточно сказать, что в этой области критическое магнитное поле  $H_c$  и критический ток  $I_c$ , т. е. разрушающие сверхпроводимость поле и ток, весьма малы (при  $T \rightarrow T_c$  значения  $H_c$  и  $I_c$  стремятся к нулю). В силу сказанного, до сих пор сверхпроводники можно использовать, лишь применяя в качестве охладителя гелий (точка кипения  $T_b = 4,2^\circ \text{K}$ ), поскольку жидкий водород (точка кипения  $T_b = 20,3^\circ \text{K}$ ) при  $T_m = 14^\circ \text{K}$  уже затвердевает (твердое же вещество использовать в качестве охладителя, вообще говоря, и нелегко, и неудобно).

Еще 25—30 лет назад и гелия мало добывали (его дефицит, впрочем, ощущается и сейчас), и техника ожижения была несовершенной. В результате во всем мире имелось лишь небольшое число маломощных гелиевых ожижителей. Применение сверхпроводников для создания сверхпроводящих магнитов (а это до сих пор важнейший прибор, в котором используются сверхпроводники) в не меньшей степени лимитировалось также низкими значениями  $H_c$  и  $I_c$  для известных ранее материалов (для Hg поле  $H_c \approx 400$  э даже при  $T \rightarrow 0$ ).

В самом начале прошлого десятилетия положение, однако, радикально изменилось. Получить жидкий гелий теперь не проблема. Там, где это дело налажено как следует, ожижителей в лабораториях и институтах вообще не устанавливают, а по телефону заказывают у специальной фирмы или на заводе нужное количество жидкого гелия (его транспортируют в больших дьюарах). Преодолен и «магнитно-токовый барьер» — получены сверхпроводящие материалы, из которых можно делать магниты с полем  $H_c$ , достигающим сотен килоэрстед (у упомянутого сплава ниобия, алюминия и германия с  $T_c \approx 21^\circ$  сверхпроводимость исчезает лишь в поле  $H_c \sim 400$  кэ). У используемых на практике материалов пока, правда, критические поле и ток не столь велики, чтобы создать магнит на 300—400 кэ. Но это, видимо, дело лишь технологии, техники. По-видимому, нет никаких обстоятельств принципиального характера, мешающих созданию при гелиевых температурах магнитов, скажем, на 300 кэ\*). Наоборот, принципиальным и неясным моментом является крайне соблазнительная возможность создания высокотемпературных сверхпроводников, т. е. металлов, остающихся сверхпроводящими при температурах жидкого азота (для азота  $T_b = 77,4^\circ \text{K}$ ), а еще лучше и при комнатной температуре.

Автор подробно остановился на современном состоянии проблемы высокотемпературной сверхпроводимости в обзорах<sup>4</sup>. Тем больше оснований ограничиться здесь лишь несколькими замечаниями.

Сверхпроводимость возникает, если электроны в металле вблизи поверхности Ферми притягиваются друг к другу, в силу чего они образуют пары, которые претерпевают нечто подобное бозе-эйнштейновской конденсации. Критическая температура для сверхпроводящего перехода  $T_c$  пропорциональна энергии связи электронов в паре и, грубо говоря, определяется двумя факторами: силой притяжения (связи), которую можно характеризовать некоторым параметром  $g$ , и шириной  $k\theta$  той области энергий вблизи поверхности Ферми, где еще имеет место притяжение между электронами. При этом

$$T_c \sim \theta e^{-1/g}. \quad (2)$$

\*) Получение сверхпроводников с высокими значениями  $H_c$  и  $I_c$  явилось в основном следствием большой экспериментальной и технологической работы. Теория в этом вопросе, особенно если говорить о больших критических токах, не играла определяющей роли.

По-видимому, всегда  $g \leq 1$ , а для некоторых моделей даже  $g \leq 1/2$ ; для большинства известных сверхпроводников  $g \leq 1/3 - 1/4$  [формула (2) непосредственно пригодна как раз при  $g \ll 1$ ]. Температура  $\theta$  в (2) зависит от механизма, приводящего к притяжению между электронами. В известных случаях этот механизм, видимо, определяется взаимодействием электронов с решеткой. В этом случае  $\theta \sim \theta_D$ , где  $\theta_D$  — дебаевская температура, физический смысл которой состоит в том, что  $k\theta_D$  — это энергия самых коротковолновых фононов в теле. Длина волны таких фононов  $\lambda \sim a \sim 3 \cdot 10^{-8}$  см ( $a$  — постоянная решетки) и  $k\theta_D \sim \hbar\omega_D$ .  $\omega_D \sim u/a \sim 10^{13} - 10^{14}$ , где  $u \sim 10^5 - 10^6$  см/сек — скорость звука. Таким образом,  $\theta_D \sim 10^2 - 10^3$  °К.

При  $\theta_D = 100^\circ$  и  $g = 1/2$  согласно формуле (2)  $T_c \sim \theta_D e^{-2} = 13,5^\circ$  К. а вообще для фононного механизма  $T_c \leq 30 - 40^\circ$  К. Тем самым, с одной стороны, возможности повышения  $T_c$  традиционными методами (создание новых сплавов, их обработка) еще, видимо, далеко не исчерпаны (мы уже не говорим о веществах типа металлического водорода; см. ниже). С другой стороны, представляется понятным, почему трудно, а скорее всего, и невозможно, ожидать создания на основе фононного механизма подлинно высокотемпературных сверхпроводников с  $T_c \geq 80 - 300^\circ$  К (здесь опять оставляем в стороне металлический водород).

Надежды на получение высокотемпературных сверхпроводников связываются с использованием экситонного механизма притяжения между электронами. В этом случае в (2)  $\theta \sim 10^3 - 10^5$  °К и если бы удалось обеспечить достаточно сильную связь ( $g \geq 1/5$ ), то значения  $T_c$  оказались бы большими. По уже указанной причине (наличие обзоров <sup>4</sup>) и в связи с недостатком места не будем здесь подробнее касаться перспектив и путей применения экситонного механизма. Достаточно сказать, что таких путей несколько, но конкретных исследований на нужном уровне проведено еще очень мало. Если проблемой термоядерного синтеза вплотную занимаются уже 20 лет, то исследования в области высокотемпературной сверхпроводимости только разворачиваются. С другой стороны, в этом случае, быть может, вовсе не нужно проводить какой-то сверхсложный синтез новых веществ и совсем не исключена возможность добиться успеха сравнительно скромными (хотя и современными) средствами. Поэтому я не удивился бы, если бы прочел о создании высокотемпературного сверхпроводника в очередном номере физического журнала (другое дело, что в этом случае, по всей вероятности, возникла бы сенсация и о новостях мы узнали бы из газет или радиопередач). Но не менее вероятно, что высокотемпературные сверхпроводники создать очень трудно, а в принципе и невозможно. Коротко говоря, вопрос еще открыт, и попытки на него ответить представляются исключительно привлекательными.

### 3. Новые вещества (металлический водород, аномальная вода и т. п.)

На Земле существует в природных условиях или создано искусственно огромное количество различных веществ (химических соединений, сплавов, растворов, полимеров и т. д.). Создание новых веществ, вообще говоря, относится к области химии или технологии, но не составляет физической проблемы. Положение меняется, когда речь заходит о совсем необычных (если угодно, экзотических) веществах. Сюда можно отнести уже упоминавшиеся высокотемпературные сверхпроводники, а в качестве двух других примеров укажем на металлический водород <sup>5</sup> и аномальную воду <sup>6</sup>.

Как известно, в обычных условиях (скажем, при атмосферном давлении) водород является молекулярным, кипит при  $T_b = 20,3^\circ \text{K}$  и затвердевает при  $T_m = 14^\circ \text{K}$ . Плотность твердого водорода  $\rho = 0,076 \text{ г/см}^3$ , и он является диэлектриком. Однако при достаточно сильном сжатии, когда внешние атомные оболочки оказываются раздавленными, все вещества должны переходить в металлическое состояние. Грубая оценка плотности металлического водорода может быть получена, если считать, что расстояние между протонами порядка боровского радиуса  $a_0 = (\hbar^2/me^2) = 0,529 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ . Отсюда  $\rho \sim Ma_0^{-3} \sim 10 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$  ( $M = 1,67 \cdot 10^{-24} \text{ г}$  — масса протона). Количественные расчеты приводят к меньшей плотности: согласно <sup>5а</sup> молекулярный водород находится в термодинамическом равновесии с металлическим водородом при давлении  $p = 2,60 \text{ Мбар}$ , когда плотность металлического водорода равна  $\rho = 1,15 \text{ г/см}^3$  (плотность молекулярного водорода при этом составляет  $\rho = 0,76 \text{ г/см}^3$ ). Возможно, металлический водород является сверхпроводящим, причем с высоким значением  $T_c$ , достигающим  $100\text{—}300^\circ \text{K}$  (для металлического водорода дебаевская температура  $\theta_D \approx 3,5 \cdot 10^3 \text{ }^\circ\text{K}$ ; поэтому по формуле (2) с  $g \leq 1/2$  температура  $T_c \leq 500^\circ$ ).

Получение такого простейшего в некотором отношении металла, как металлический водород, и определение для него критической температуры  $T_c$  представляет очевидный физический интерес, а также может иметь актуальное астрофизическое значение (достаточно сказать, что большие планеты в значительной своей части должны содержать металлический водород; см. <sup>5б</sup>). Но еще несравненно важнее возможность того, что металлический водород окажется устойчивым (хотя, конечно, и метастабильным) даже без давления. Существование подобных вполне устойчивых метастабильных модификаций общеизвестно (примером может служить алмаз, который при низких температуре и давлении обладает более высокой свободной энергией по сравнению с графитом). Насколько известно, в отношении металлического водорода вопрос о его устойчивости при отсутствии давления остается открытым. Если соответствующие расчеты дадут основания надеяться на положительный ответ (т. е. будут свидетельствовать об устойчивости металлического водорода или его сплавов с более тяжелыми элементами, даже при равном нулю давлении), то создание металлического водорода и его сплавов станет одной из важнейших задач макроскопической физики. Впрочем, как ясно из сказанного, эта проблема достаточно интересна в любом случае.

Другой, уже упомянутый пример новых веществ — это аномальная вода (ее называют также сверхплотной или полимерной водой). В работах <sup>6а</sup> было высказано утверждение, что в определенных условиях (конкретно, например, в кварцевых капиллярах) чистая вода образует некоторую новую модификацию с плотностью  $1,4 \text{ г/см}^3$  и рядом других свойств, существенно отличных от свойств обычной воды. Было высказано предположение, что речь идет о полимерных молекулах типа  $(\text{H}_2\text{O})_n$ . Эти результаты были, казалось бы, полностью подтверждены <sup>6б</sup>; была также получена аномальная вода в капиллярах, не содержащих кремния <sup>6в</sup>. Но, с другой стороны, в последнее время появились работы <sup>6г</sup>, в которых «аномальная вода» на основании ряда экспериментальных данных рассматривается как смесь обычной воды и ряда примесей (гидрозолей,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{Na}$ ,  $\text{Cl}$  и др.).

Таким образом, вопрос нужно считать открытым, хотя, на мой взгляд, работы <sup>6г</sup> оставляют не так уж много надежды на существование чистой полимерной (сверхплотной) воды. Но, независимо от окончательного ответа, уже проведенные исследования ясно свидетельствуют о том, сколь трудно решить даже такой вопрос, как возможность появления

новой формы одного из самых распространенных веществ \*); теоретические расчеты <sup>6д</sup> здесь также ненадежны. Этот пример поучителен во многих отношениях, в частности, как напоминание о необходимости любое открытие считать окончательно установленным лишь после многократной и всесторонней проверки.

#### 4. Металлическая экситонная (электронно-дырочная) жидкость в полупроводниках <sup>8</sup>

Если в полупроводнике имеются электроны и дырки (скажем, созданные в результате освещения), то при достаточно низкой температуре они должны соединиться в экситоны — водородоподобные «атомы», родственные позитронию. Энергия и радиус таких экситонов в основном состоянии в первом приближении порядка

$$\begin{aligned} E_{0, \text{э}} &\sim \frac{e^4 m_{\text{eff}}}{2\epsilon^2 \hbar^2} = \frac{E_0 m_{\text{eff}}}{m\epsilon^2}, \\ a_{0, \text{э}} &\sim \frac{\hbar^2 \epsilon}{m_{\text{eff}} e^2} = \frac{a_0 \epsilon m}{m_{\text{eff}}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $E_0 = e^4 m / 2\hbar^2$  и  $a_0 = \hbar^2 / m e^2$  — известные выражения Бора для энергии и радиуса атома водорода,  $m_{\text{eff}}$  — эффективная масса электрона и дырки (здесь эти массы считаются равными, а анизотропия не учитывается) и  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость полупроводника.

Поскольку в ряде случаев  $\epsilon \leq 10$ , а  $m_{\text{eff}} \leq 0,1m$ , становится ясным, что радиус экситонов  $a_{0, \text{э}} \gtrsim 10^{-6}$  см, а их энергия  $E_{0, \text{э}} \lesssim 10^{-2}$  эв  $\sim 100^\circ$  К. Очевидно, эти изменения (по сравнению с атомом водорода) связаны с ослаблением кулоновского притяжения в  $\epsilon$  раз, а также с малостью эффективной массы  $m_{\text{eff}}$  (по сравнению с массой свободного электрона  $m$ ).

Как уже упоминалось в связи с проблемой металлического водорода. критерий высокой плотности и металлизации, грубо говоря, сводится к тому, что размер электронной оболочки сравнивается с межъядерным расстоянием. В случае экситонов в полупроводнике это значит, что их совокупность является плотной при концентрации  $n_{\text{э}} \sim a_{0, \text{э}}^{-3} \leq 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Таким образом, для экситонов высокая плотность, достигаемая для водорода при давлениях в миллионы атмосфер, отвечает вполне обычной концентрации электронов и дырок в полупроводниках  $n \sim 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Уже одна такая возможность имитировать в полупроводниках область сверхвысоких давлений делает обсуждаемый вопрос достаточно важным. Это заключение укрепляется, если задуматься над возможным поведением плотной системы экситонов в полупроводнике. Такая система должна становиться жидкой и образовывать капли. Скорее всего, эти капли представляют собой электронно-дырочный металл, т. е. подобны жидкому металлу, хотя и не исключена возможность их «молекулярного» строения — в этом случае они аналогичны жидкому водороду, состоящему из молекул Н<sub>2</sub> (роль молекул в молекулярной и, следовательно, диэлектрической экситонной жидкости играют биекситоны — два соединившихся друг с другом экситона). В электронно-дырочной (экситонной) жидкости может, в принципе, наблюдаться сверхпроводимость или сверхтекучесть. Коротко говоря, экситонная (электронно-дырочная) жидкость в полупроводниках должна обладать целым рядом интереснейших свойств и особен-

\* Любопытно, что «гипотеза» о существовании необычной формы льда (лед-9) лежит в основе «научной» части одного известного фантастического романа <sup>7</sup>.



ностей, зависящих, конечно, от характеристик используемого «контейнера» — полупроводника. Экспериментальное исследование этой проблемы уже начато<sup>8</sup>; можно думать, что в ближайшие годы она будет находиться в центре внимания физики полупроводников.

### 5. Фазовые переходы второго рода (критические явления)

Сверхпроводящий переход, превращение гелия I в сверхтекучий гелий II, возникновение ферромагнитного состояния из парамагнитного, многие сегнетоэлектрические (ферроэлектрические) переходы, ряд превращений в сплавах — таковы широко известные примеры фазовых переходов второго рода<sup>9</sup>. При таких переходах отсутствует выделение (или поглощение) скрытого тепла, нет скачка объема или скачка в параметрах решетки, т. е. в известном смысле превращение можно считать непрерывным. Вместе с тем в точке перехода наблюдаются скачки теплоемкости, сжимаемости и других величин, а вблизи точки перехода многие из этих величин ведут себя аномальным образом. Так, теплоемкость для перехода гелий I  $\rightleftharpoons$  гелий II и некоторых других переходов неплохо описывается законом  $c \sim \ln |T - T_c|$ , где  $T_c$  — температура перехода ( $\lambda$ -точки). Магнитная и диэлектрическая проницаемость в случае соответственно ферромагнитного и сегнетоэлектрического переходов при  $T \rightarrow T_c$  стремятся к бесконечности и часто приближенно описываются законом Кюри  $\chi \sim |T - T_c|^{-1}$ .

К фазовым переходам второго рода примыкают некоторые переходы первого рода, близкие к так называемой критической точке Кюри (см. <sup>9a</sup>). Суть дела состоит в том, что при изменении ряда параметров (например, давления) переходы второго рода могут стать переходами первого рода (точка, в которой переходят друг в друга кривые для переходов разных типов на  $p, T$ -диаграмме и называется критической точкой Кюри). Естественно, что переходы первого рода, близкие к критической точке Кюри, родственны переходам второго рода (скрытая теплота перехода отлична от нуля, но мала; в то же время наблюдается аномалия теплоемкости и т. п.; к числу таких переходов относятся, например, некоторые сегнетоэлектрические превращения и, по-видимому,  $\alpha \rightleftharpoons \beta$ -переход в кварце). Наконец, переходам второго рода аналогичны критические точки жидкость — пар (газ) и некоторые другие.

Проблема фазовых переходов второго рода (и близких к ним переходов; см. также <sup>9b</sup>) состоит, очевидно, в достижении достаточно полного качественного и количественного понимания различных явлений вблизи точек перехода. В частности, речь идет о нахождении температурной зависимости всех величин — их зависимости от разности  $(T - T_c)$ .

Непрерывный характер переходов второго рода делает естественным их рассмотрение на основе разложения термодинамических величин (например, термодинамического потенциала) в ряд по некоторому параметру  $\eta$ , обращающемуся в равновесии в нуль при  $T \geq T_c$ . Далее, коэффициенты  $A, B, C$  и др. соответствующего разложения

$$\Phi = \Phi_0 + A\eta^2 + B\eta^4 + C\eta^6 + \dots$$

в свою очередь разлагаются в ряд по степеням  $(T - T_c)$ , так что вблизи типичного перехода второго рода  $A = A'(T - T_c)$  и  $B = B_0 = \text{const}$ . Такой подход, восходящий к Гиббсу и Ван-дер-Ваальсу, был систематически развит Ландау <sup>9a</sup>.

В рамках теории Ландау для восприимчивостей получается закон Кюри  $\chi \sim |T - T_c|^{-1}$ ; магнитная или электрическая спонтанные

поляризации  $M$  и  $P$  при  $T < T_c$  меняются по закону  $M \sim \sqrt{T_c - T}$ ,  $P \sim \sqrt{T_c - T}$  и т. д. Вместе с тем в теории Ландау в общем не находит объяснения аномальный температурный ход теплоемкости и других величин при  $T \rightarrow T_c$ . Кроме того, более детальные измерения показали<sup>96</sup>, что закон Кюри и другие аналогичные соотношения неточны, так что  $\chi \sim |T_c - T|^{-\gamma}$  и  $M \sim (T_c - T)^\beta$ , причем  $\gamma \neq 1$  и  $\beta \neq 1/2$ .

Теория Ландау приводит к тем же результатам, как и модельные теории (типа известной теории ферромагнетизма Вейсса), в которых используется метод самосогласованного (или, как иногда говорят, молекулярного) поля. Как из этого факта, так и, конечно, из существа дела ясно, что ограничения теории Ландау связаны с пренебрежением флуктуациями. Именно, рассматривается среднее значение, например, намагниченности  $M$ . Вместе с тем при  $T \rightarrow T_c$  эта средняя величина  $M \rightarrow 0$ , в то время как флуктуации  $M$  не только не исчезают, но, наоборот, сильно возрастают. Понятно поэтому, что область применимости теории Ландау, различная для разных переходов, есть область сравнительной малости флуктуаций<sup>9в</sup>. В окрестности точки перехода, т. е. при достаточной малости разности  $(T_c - T)$ , необходимо учитывать флуктуации, что и приводит к аномальному ходу теплоемкости, отклонениям от закона Кюри  $\chi \sim (T_c - T)^{-1}$  и т. п.

Последовательная теория фазовых переходов второго рода для трехмерных систем еще не построена, хотя на решение этой задачи были затрачены исключительно большие усилия\*). Но эти усилия все же отнюдь не пропали даром — в последние годы, хотя и не удалось полностью решить задачу, был получен целый ряд важных результатов. К их числу в первую очередь относятся законы подобия<sup>9б, в</sup>, позволившие связать между собой температурную зависимость различных величин вблизи точки перехода  $T_c$ . В силу этих законов и при учете некоторых экспериментальных данных удается, например, предсказать, что при  $T \rightarrow T_c$  магнитная восприимчивость  $\chi \sim (T - T_c)^{-\gamma}$  с  $\gamma = 4/3$  (вместо  $\gamma = 1$ , согласно теории Вейсса или Ландау).

Создание последовательной теории фазовых переходов второго рода с учетом отличий, характерных для различных превращений, а также обобщение всех результатов на кинетические процессы вблизи  $T_c$ , остается одной из центральных проблем физики твердого тела.

В качестве примеров приведем две более конкретные задачи, выбор которых (из числа других), быть может, случаен и диктуется лишь интересами автора. Первая задача — поведение гелия II вблизи  $\lambda$ -точки. В теории сверхтекучести Ландау плотность сверхтекучей компоненты гелия  $\rho_s$  считается некоторой заданной функцией, скажем, температуры  $T$  и давления  $p$ . Но с точки зрения общей теории фазовых переходов второго рода плотность  $\rho_s$  нельзя задавать, она должна сама определяться из условия минимума термодинамического потенциала. Такой подход<sup>9д</sup> приводит к ряду интересных следствий — зависимости  $T_c \equiv T_\lambda$  и теплоемкости  $s$  от толщины пленки гелия II, к неоднородности  $\rho_s$  вблизи твердой стенки или вблизи оси вихря в гелии II и т. п. По-видимому, все эти выводы отвечают действительности, но в целом создание теории сверхтекучести гелия II вблизи  $\lambda$ -точки еще не завершено. Второй пример — рассеяние света вблизи точек фазового перехода второго рода и, конкретно, точки  $\alpha \rightleftharpoons \beta$ -превращения в кварце<sup>9е</sup>. Поскольку при приближении к  $T_c$  флуктуации возрастают, сразу же очевидно, что в этой области можно ожидать увеличения интенсивности рассеяния рентгеновских лучей,

\*) Л. Д. Ландау как-то сказал мне, что ни на одну задачу он не потратил столько сил, сколько на попытки решить проблему фазовых переходов второго рода.

нейтронов и света. Подобное явление (критическая опалесценция) давно уже известно в случае критической точки жидкость — пар. Резкое повышение интенсивности рассеяния света наблюдается и в кварце  $^{96}$ , вблизи происходящего при температуре  $T_c = 846^\circ \text{K}$  перехода его из  $\alpha$ - в  $\beta$ -модификацию. Казалось бы, здесь все в принципе ясно, но недавно выяснилось  $^{97}$ , что картина сложнее и, видимо, не описывается простой теорией  $^{96}$ . Возможно, дело в том, что при переходе  $\beta$ -кварца в  $\alpha$ -кварц происходит двойникование (образуются так называемые электрические или дофинеи-ские двойники) и повышенное рассеяние в значительной своей части происходит на границах между двойниками. В теории же двойникование последовательным образом учтено не было, и в целом картина рассеяния остается неясной. Разумеется, исследование рассеяния света при  $\alpha \rightleftharpoons \beta$ -переходе в кварце это лишь частный вопрос, но таких вопросов много и в своей совокупности все эти аспекты проблемы фазовых переходов второго рода несомненно составляют одно из важнейших направлений макрофизики.

### 6. Сверхтяжелые элементы (далекие трансураны) $^{10}$

Самый тяжелый обнаруженный в природе элемент, уран, состоит из  $Z = 92$  протонов и  $N = 146$  нейтронов (речь идет об  $^{238}\text{U}$ ). Начиная с 1940 г. начали искусственно создавать трансуранные элементы путем облучения тяжелых ядер (включая ядра урана и трансуранов) нейтронами и различными ядрами. Первым был создан нептуний ( $\text{Np}_{93}$ ), за ним последовали плутоний ( $\text{Pu}_{94}$ ), америций ( $\text{Am}_{95}$ ), кюрий ( $\text{Cm}_{96}$ ), берклий ( $\text{Bk}_{97}$ ), калифорний ( $\text{Cf}_{98}$ ), эйнштейний ( $\text{Es}_{99}$ ), фермий ( $\text{Fm}_{100}$ ), менделевий ( $\text{Md}_{101}$ ) и элементы 102, 103, 104 и 105, еще не получившие официального названия. Самые тяжелые известные трансуранные элементы живут секунды или даже доли секунды (ядра распадаются в результате излучения  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц и спонтанного деления). Грубая экстраполяция приводит к заключению, что элементы с  $Z \geq 108$ —110 должны спонтанно делиться с такой большой скоростью, что получение и изучение таких элементов маловероятно. Однако, хотя трансураны содержат 240—260 частиц (нуклонов) и в этом отношении напоминают капельки жидкости, их свойства все же не меняются монотонно с ростом  $Z$  или, скажем, параметра  $Z^2/A$ . Иными словами, одностичные и оболочечные эффекты заметны, а иногда значительны даже для самых тяжелых элементов. В этой связи имеется надежда на возможность существования сравнительно долгоживущих изотопов элементов с  $Z > 105$ . Конкретно, предполагается, что элемент с  $Z = 114$  обладает замкнутой оболочкой (т. е., что  $Z = 114$  является магическим числом), а изотоп этого элемента  $^{298}114$ , содержащий  $N = 184$  нейтрона, является даже дважды магическим. Это не значит еще, что ядро  $^{298}114$  самое стабильное, ибо нужно учитывать все возможные пути распада (спонтанное деление,  $\alpha$ - и  $\beta$ -распады). В частности, некоторые расчеты приводят к выводу о наибольшей «живучести» ядра  $^{294}110$ , обладающего периодом полураспада  $T_{1/2} \sim 10^8 \text{ лет}$ . По мнению, являющемуся, видимо, общепризнанным, точность всех таких расчетов невелика и они не имеют какого-либо количественного значения. Но сама возможность повышенной стабильности ядер в районе значений  $Z \sim 114$  и  $N \sim 184$  кажется вероятной, причем не исключено даже существование высокой стабильности отдельных или хотя бы одного изотопа. В последнем случае такой изотоп мог бы наблюдаться на Земле, в метеоритах или в космических лучах. Кроме того, конечно, более или менее стабильные изотопы (скажем, с  $T_{1/2} > 1 \text{ сек}$ ) можно надеяться синтезировать и обнаружить методами, использованными в случае уже известных трансуранов. Поиски

далеких трансуранов уже начали вести на всех этих путях. Такие поиски имеют немалый интерес для ядерной физики, а возможно, и астрофизики (не говоря уже о том, что эти поиски подобны охоте на невиданных животных). Поэтому вряд ли кто-либо будет возражать против включения проблемы сверхтяжелых элементов в наш «список». Что же касается отнесения этой проблемы к макрофизике, то здесь, конечно, дело в определении микрофизики, которое будет дано и использовано ниже.

## II. МИКРОФИЗИКА

### 7. В в е д е н и е

Когда речь шла о макрофизике, не потребовалось никакого введения. Но о том, что понимать под микрофизикой, придется условиться. Размеры атома ( $\sim 10^{-8}$  см) и тем более атомного ядра ( $10^{-13}$ — $10^{-12}$  см) считаются микроскопическими и, с этой точки зрения, атомные и ядерные явления следует отнести к микрофизике.

Но фактически дело обстоит не так просто.

Хорошо известно, что в физике (да и не только в физике) говорить о малом или большом можно лишь по сравнению с какой-то величиной (эталоном), которая считается не малой и не большой. В случае длины (пространственного расстояния) таким эталоном естественно считать характерный размер человеческого тела — скажем, метр. Однако по сравнению с таким масштабом очень малы не только атомы и ядра, но и, например, длины волн оптического излучения, а также размеры ряда искусственно создаваемых объектов. Вместе с тем вряд ли кто-либо согласится относить к области микромира пленки или проволоочки с диаметром порядка микрона. К этому нужно добавить, что по сравнению с метром размеры Земли, а тем более расстояние от Земли до Солнца, равное  $1,5 \cdot 10^{13}$  см, являются уже очень большими. Поэтому, если исходить только из отношения масштабов, Солнечную систему следовало бы отличать от макрообъектов с размерами порядка метров с неменьшим основанием, чем атомы и атомные ядра.

В силу подобных соображений микромир часто определяют как область действия квантовых законов, в то время как в макромире господствуют классические закономерности. Такой подход представляется весьма глубоким, хотя его условность также очевидна. Достаточно сказать, что в ряде случаев классические законы хорошо применимы и при рассмотрении соударений между нуклонами, а, с другой стороны, квантовые закономерности иногда определяют поведение вполне макроскопических систем (упомянем, например, о квантовании магнитного потока через полые сверхпроводящие цилиндры). Наконец, важно подчеркнуть, что с развитием науки меняются, вообще говоря, сами границы между различными областями и дисциплинами, меняется также содержание различных понятий.

Все это дает основания рассматривать границу между микро- и макрофизикой в качестве исторической категории. Конкретно, мне представляется разумным и оправданным считать, что в настоящее время атомная и ядерная физика в основном уже относятся к макро-, а не к микрофизике.

Основания для этого таковы. Во-первых, атомы и ядра представляют собой совокупности частиц и, к тому же, системы, состоящие лишь из немногих самых распространенных частиц (протонов, нейтронов и электронов). Во-вторых, в атомах и ядрах обычно хорошо пригодно нерелятивистское приближение, т. е. широко применима прекрасно освоенная

нерелятивистская квантовая механика. Оба эти обстоятельства роднят атомную и ядерную физику с макрофизикой.

Естественность смещения условной границы, разделяющей микро- и макрофизику, ясна и из такого примера. До изобретения микроскопа к области микроявлений с полным основанием можно было отнести все невидимое человеческим глазом. Затем микроскопическим стали называть невидимое в микроскоп, например, отдельные атомы. Сейчас, когда атомные, а в известной мере и ядерные масштабы уже освоены и достаточно доступны нашему мысленному взору \*), имеются основания считать микроскопическим лишь плохо или совсем невидимое. Тем самым к микрофизике почти безоговорочно относятся такие области, которые называли и еще называют физикой элементарных частиц, физикой высоких энергий, мезонной физикой, нейтринной физикой и т. п.

Объектом исследования в микрофизике являются, следовательно, в основном только «простейшие» («элементарные») частицы, их взаимодействия, управляющие ими законы.

Как и большинство определений, такое определение и понимание микрофизики условно, в известной мере даже произвольно. Но оно представляется мне по крайней мере не менее определенным и не менее допустимым, чем другие определения. Так или иначе, ниже термин микрофизика используется именно в указанном смысле. При этом почти автоматически микрофизика, как и в прошлом, оказывается областью исследований, где еще не докопались до фундамента и еще далеко до ясности. Если же иметь в виду тип закономерностей, то в микрофизике в настоящее время (при принятом определении) доминирует релятивистская квантовая теория. Наконец, если за основу принять некоторое расстояние, то для микрофизики сейчас характерна длина порядка или меньшая  $10^{-13}$  см (комptonовская длина для электрона  $\hbar/mc = 3,85 \cdot 10^{-11}$  см, а для барионов  $\hbar/Mc \sim 10^{-14}$  см \*\*).

Трудности, которые стоят на пути решения фундаментальных проблем микрофизики, подобны тем, которые возникали при построении теории относительности и квантовой механики. Подобные исследования, даже если они достигают сравнительно скромных результатов, требуют исключительных усилий, фантазии, напряжения. Они порождают особую атмосферу, вызывают к жизни высокий накал страстей, разных страстей... Но это уже другая тема \*\*\*) , здесь же ограничусь констатацией того факта,

\*) Впрочем, отдельные атомы удается уже наблюдать, можно сказать, и непосредственно с помощью автономного микроскопа (см. УФН, 92, 293 (1967)) и, видимо, также используя специальный электронный микроскоп (см. Physics Today 23 (8), 41 (1970)).

\*\*) Наиболее глубокой является, видимо, классификация, основанная на типе или характере закономерностей. В этой связи самым последовательным в настоящее время представляется выделение трех областей, в которых главенствуют соответственно классические законы, нерелятивистская квантовая механика и, наконец, релятивистская квантовая теория. Эти три области можно было бы называть макрофизикой, микрофизикой и, скажем, ультрамикрофизикой. Но самое последовательное далеко не всегда оказывается самым удобным и привычным. Поэтому нам кажется наилучшим поступить так, как это сделано в тексте, т. е., как и в прошлом, говорить только о макро- и микрофизике, но передвинуть границу между ними.

\*\*\*) Тема эта скорее для писателя, и, к сожалению, я не могу сейчас привести пример вполне удачного ее решения. Правда, в качестве яркой иллюстрации, передающей характер работы над фундаментальными проблемами, на ум приходят слова, которыми Эйнштейн закончил свою лекцию, посвященную истории создания общей теории относительности <sup>11</sup>: «В свете уже достигнутых результатов счастливо найденное кажется почти само собой разумеющимся, и любой толковый студент усваивает теорию без большого труда. Позади остались долгие годы поисков в темноте, полных предчувствий, напряженное ожидание, чередование надежд и изнеможения и, наконец, прорыв к ясности. Но это поймет только тот, кто пережил все сам».

что адекватно отразить содержание и своеобразие проблем микрофизики мне не под силу. Такая задача и не ставится: ниже, еще с большей условностью, чем в других случаях, выделены четыре микрофизические проблемы и дана лишь самая конспективная их характеристика. Быть может, именно чувство неудовлетворенности изложением микрофизической части настоящей статьи побудило автора написать это введение, а также ниже следующий раздел 12, без которых статья, возможно, только выиграла бы. К счастью, проблемы микрофизики освещаются весьма часто и компетентно, так что у нас есть куда отослать читателей (см. статьи <sup>12</sup>, а также ссылки <sup>13-19</sup>).

### 8. Спектр масс (третья спектроскопия)

До 1932 г. были известны лишь три «элементарные» частицы — электрон, протон и фотон. Затем были открыты нейтрон, позитрон,  $\mu^\pm$ -мезоны,  $\pi^\pm$ - и  $\pi^0$ -мезоны, более тяжелые мезоны, гипероны, частицы-резонансы, электронное и мюонное нейтрино и антинейтрино. Некоторые из этих частиц ничем не менее (но и не более) элементарны, чем протон или электрон. Другие (например, гипероны и частицы-резонансы) кажутся скорее возбужденными состояниями более легких частиц. Большинство частиц нестабильно, они превращаются друг в друга. Тем самым понятия об элементарности или сложности частиц сами становятся весьма неэлементарными и сложными. Настоящая статья и так пересыщена оговорками и определениями, в силу чего я не буду пытаться подробнее касаться вопроса об элементарности или сложности частиц, с которыми имеет дело микрофизика. Эти частицы характеризуются массой, спином, зарядом, временем жизни и рядом других величин и квантовых чисел <sup>12а, е</sup>. Все такие характеристики находят на опыте или, в лучшем случае, предсказывают на основе некоторых полуэмпирических закономерностей и формул.

Тем самым основной и еще далеко не решенной задачей микрофизики можно считать создание теории, из которой, хотя бы в принципе, должны определяться массы и все другие параметры существующих частиц. Для простоты эту проблему часто называют задачей определения спектра масс, хотя все понимают, что речь идет отнюдь не только о массах частиц, но и о других их характеристиках \*).

Современное состояние проблемы спектра масс в целом аналогично состоянию атомной спектроскопии до появления теории атома Бора. Тогда тоже были известны некоторые спектральные закономерности (в первую очередь формула Бальмера), но они не были выведены теоретически. Сейчас в области третьей спектроскопии \*\*) положение такое же или немного лучше, но заведомо не идущее ни в какое сравнение с ситуацией, возникшей в атомной физике после создания квантовой механики.

В известном отношении проблема спектра масс возникла уже давно, поскольку вопрос о причинах различия масс протона и электрона задавался еще столетия назад. Затем проблема спектра масс начала обсуждаться в плане создания релятивистской теории частиц с возбужденными состояниями <sup>13</sup>. Сейчас, после накопления сведений о таких состояниях и, вообще, экспериментальных данных в области третьей спектроскопии,

\*) Более того, различия, которые существуют, например, между барионами и лептонами, являются качественными и более глубокими, чем, скажем, между барионами с различными массами.

\*\*) Пользуемся здесь представляющей удачной и наглядной терминологией <sup>12а</sup>, согласно которой атомные и молекулярные уровни относят к первой спектроскопии, ядерные уровни — ко второй спектроскопии и уровни «элементарных» частиц — к третьей спектроскопии (впрочем, термин третья спектроскопия непосредственно применяется в <sup>12а</sup> только к спектру барионов).

проблема спектра масс, видимо, уже имеет по крайней мере эмпирический фундамент. Но в области теории, как мне кажется, говорить о каком-то подлинном успехе не приходится, ибо достижения типа систематики и классификации частиц<sup>12</sup>, как они ни важны, еще не носят фундаментального характера.

Решить проблему спектра масс пытались путем создания релятивистских моделей волчков, осцилляторов и т. п.<sup>13</sup>. Другое направление — единая полевая теория элементарных частиц<sup>14а</sup>, которая может быть также названа теорией первоматерии, поскольку делается попытка в основу положить некоторое первичное спинорное поле со спином 1/2. Третье направление — попытки считать барионы и мезоны частицами, состоящими из различных комбинаций трех основных частиц (кварков). Однако кварки в свободном состоянии не обнаружены, а теория связанных кварков не вышла из пеленок<sup>12а</sup>. Четвертое направление связано с учетом эффектов общей теории относительности (фридмоны<sup>14б</sup> и существование фундаментальной длины, связанной с гравитацией; см. разделы 9 и 15).

Несколько особняком стоит вопрос о спектре масс лептонов и, конкретно, о причинах различия масс электрона и  $\mu$ -мезона. Упомянем также о поисках «экзотических» частиц (магнитных полюсов — монополей, кварков и т. п.).

Ни одна попытка решить проблему спектра масс, как уже было сказано, не привела к подлинному, определенному успеху. Так дело обстоит уже десятилетия и никто не может предсказать, когда же, наконец, «лед тронется». Но когда-то это произойдет, и, несмотря на все разочарования, этого исторического события продолжают ждать с неослабевающим и напряженным вниманием.

#### 9. Фундаментальная длина (квантованное пространство и т. п.)

В специальной и общей теории относительности, в нерелятивистской квантовой механике, в существующей теории квантовых полей используется представление о непрерывном, по сути дела классическом, пространстве и времени (точка пространства-времени характеризуется четырьмя координатами  $x_i = x, y, z, ct$ , могущими принимать непрерывную последовательность значений). Но всегда ли законен такой подход? Откуда следует, что «в малом» пространство и время не становятся совсем иными, какими-то «зернистыми», дискретными, квантованными? Вопрос этот отнюдь не является новым и, по-видимому, впервые был поставлен Риманом еще в 1854 г. (см. <sup>15а</sup>), а затем обсуждался неоднократно. Так, в своей известной лекции «Геометрия и опыт» Эйнштейн в 1921 г. говорил<sup>15б</sup>:

«Предложенная здесь физическая интерпретация геометрии не может быть непосредственно применена к областям пространства субмолекулярных размеров. Тем не менее даже в вопросах строения элементарных частиц она сохраняет некоторый смысл. В самом деле, в том случае, когда мы описываем электрические элементарные частицы, составляющие материю, можно сделать попытку сохранить физический смысл за теми аспектами поля, которые использовались в физике для описания геометрического поведения тел, больших по сравнению с молекулами. Только успех может служить оправданием такой попытки приписать физическую реальность основным понятиям римановой геометрии вне области их физического определения. Однако может оказаться, что подобная экстраполяция имеет не больше оснований, чем распространение понятия температуры на части тела молекулярных размеров».

Ясно сформулированная здесь проблема границ применимости римановой геометрии (т. е., по существу, макроскопических или классических геометрических представлений) остается без ответа и до сих пор. По мере продвижения в область все больших энергий и, следовательно, более «близких» столкновений различных частиц (см. раздел 10) масштаб областей пространства доступных исследованию уменьшается. Сейчас можно, видимо, утверждать, что вплоть до расстояний порядка  $10^{-15}$  см обычные пространственные соотношения справедливы или, точнее, их применение не приводит к противоречиям. Из некоторых соображений<sup>16</sup> этот предел, быть может, отодвигается до примерно  $10^{-20}$  см. В принципе, не исключено, что предела нет вообще, но все же значительно более вероятно существование какой-то фундаментальной (элементарной) длины  $l_0 \lesssim 10^{-15} - 10^{-20}$  см, которая ограничивает возможности классического пространственного описания. Более того, в настоящее время кажется разумным считать, что фундаментальная длина  $l_0$  во всяком случае не меньше гравитационной длины  $l_g = \sqrt{G\hbar/c^3} \sim 10^{-33}$  см (см. раздел 15).

Проблема фундаментальной длины в разных формах и вариантах обсуждается уже много лет (эта длина входит в теорию первоматерии<sup>14а</sup>, в различные варианты теории квантованного пространства<sup>17</sup> и др.). С проблемой фундаментальной длины тесно связан вопрос о возможных нарушениях причинности в микромире (или, как говорят, о нарушении микропричинности; см. <sup>17а</sup>), а также ряд других направлений в микрофизике и проблема сингулярностей в общей теории относительности и космологии (см. ниже раздел 15). Если какая-то фундаментальная длина существует, то естественно полагать, что она играет роль, и даже определяющую роль, также и для решения проблемы спектра масс. Фундаментальная длина, вероятно, служила бы «обрезающим» фактором, в котором в той или иной мере нуждается существующая квантовая теория поля; в теории, содержащей фундаментальную длину, по идее автоматически исчезли бы расходящиеся выражения. С экспериментальной точки зрения поиски фундаментальной длины связаны с исследованием соударений частиц при все больших и больших энергиях, а также с осуществлением сверхточных измерений ширины ядерных уровней<sup>16</sup>. Вообще, любое несогласие существующей теории (типа квантовой электродинамики) с опытом явится указанием на возможное нарушение пространственно-временных представлений и необходимость введения фундаментальной длины.

#### 10. Взаимодействие частиц при высоких и сверхвысоких энергиях

Изучение взаимодействия частиц при высоких и сверхвысоких энергиях служит целому ряду целей: «прощупыванию» структуры частиц и самого пространства на малых расстояниях, обнаружению все новых и новых частиц-резонансов (возбужденных барионов и мезонов), определению энергетической зависимости сечений для упругого и неупругого рассеяния.

При столкновении нуклона с нуклоном достигается расстояние  $l \sim \frac{\hbar}{m_{\pi c} E_{\text{ц.м}}}$ , где  $\frac{\hbar}{m_{\pi c}} \sim 10^{-13}$  см — комптоновская длина  $\lambda$ -мезона,  $M$  — масса нуклона ( $Mc^2 \approx 1$  Гэв) и  $E_{\text{ц.м}}$  — энергия нуклона в системе центра масс (подробнее см. <sup>18</sup>). Если один из нуклонов покоится, а другой имеет энергию  $E$ , то  $E_{\text{ц.м}} = \sqrt{1/2 (E + Mc^2) Mc^2}$ . Сейчас на ускорителях достигнута энергия  $E \approx 75$  Гэв (Серпухов), через год-два она будет доведена до 500 Гэв (США). Даже при  $E \sim 500$  Гэв, очевидно,  $E_{\text{ц.м}} \sim 15$  Гэв и  $l \sim 5 \cdot 10^{-15}$  см. В космических лучах встречаются частицы с энергией вплоть до  $E \sim 10^{20}$  эв, но практически вряд ли удастся использовать для



анализа соударений космические протоны с  $E > 10^{15}$  эв; (см.<sup>18а,б</sup>); при этом  $E_{ц.м} \leq 10^3$  Гэв и  $l \geq 10^{-16}$  см. При столкновениях частиц, не обладающих сильным взаимодействием (мюоны, электроны, фотоны), наименьшая длина, фигурирующая при столкновениях, порядка длины волны в системе центра масс, т. е.  $l \sim \hbar c/E_{ц.м}$  (предполагается, что  $E_{ц.м} \gg \gg m_i c^2$ , где  $m_i$  — массы сталкивающихся частиц), и возможности достичь малые расстояния несколько лучше, чем в случае нуклонов. Кроме того, за счет достижения высокой точности измерений и тщательного сравнения с теорией, вообще говоря, удается прощупывать расстояния, которые несколько меньше получаемых просто на основании приведенных грубых оценок. Но все равно совершенно ясно, сколь трудно перешагнуть предел  $l \sim 10^{-15} - 10^{-16}$  см. Сравнение теории рассеяния с опытом при все более высоких энергиях наряду с исследованием все новых резонансных состояний для барионов и мезонов и определением различных эффективных сечений составляет основную задачу физики высоких энергий. При больших энергиях при этом наблюдаются не только рассеяние и рождение отдельных частиц, но в первую очередь происходит множественное рождение частиц. Множественное рождение обладает своей спецификой, которую пытаются учитывать с помощью статистических и гидродинамических методов<sup>18в</sup>. Сказанное в основном относится к соударениям нуклонов, и поэтому особо нужно упомянуть о взаимодействии с веществом высокоэнергичных мюонов<sup>18г</sup> и нейтрино высоких энергий, которые создаются в земной атмосфере космическими лучами (речь в основном идет о нейтрино от распада  $\mu$ - и  $\pi$ -мезонов, созданных космическими лучами)<sup>18д</sup>.

В отличие от проблемы спектра масс и вопроса о фундаментальной длине, исследования взаимодействия частиц при высоких и сверхвысоких энергиях кажутся вспомогательными и менее определенными с точки зрения формулировки какой-то ясной и заманчивой физической цели. Быть может, это и так, но скорее указанное впечатление может быть обусловлено несовершенством нашего изложения. В качестве некоторого оправдания можно заметить, что все уже затронутые вопросы микрофизики фактически тесно переплетаются и в большой мере не независимы друг от друга. Выделяя особо проблему взаимодействия частиц при высоких энергиях, в первую очередь хотелось подчеркнуть, что далеко не все в физике высоких энергий сводится к проблемам спектра масс и фундаментальной длины. Так, вопрос об энергетическом ходе различных сечений взаимодействия разных частиц (особенно при сверхвысоких энергиях или, формально, при  $E \rightarrow \infty$ ) имеет для теории весьма глубокое и в известном отношении независимое значение.

#### 11. Нарушение $CP$ -инвариантности<sup>19</sup>

В 1956 г. было открыто несохранение пространственной четности ( $P$ ) при слабых взаимодействиях. Однако обнаруженные вплоть до 1964 г. распады удовлетворяли принципу комбинированной четности, согласно которому все взаимодействия инвариантны относительно  $CP$ -сопряжения, т. е. одновременной пространственной инверсии и зарядового сопряжения  $C$  (замены частицы на античастицу).

В 1964 г. было сделано открытие, значение которого, видимо, исключительно велико, хотя еще далеко не полностью понято. Речь идет об обнаружении распада  $K_2^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$  ( $K_2^0$  — долгоживущий нейтральный  $K$ -мезон), который может идти только при нарушении комбинированной четности. Итак, в природе наблюдается нарушение  $CP$ -инвариантности. Такой результат приводит, возможно, к фундаментальным выводам о неэквивалентности правого и левого, о неэквивалентности прямого

и обратного направлений времени, о неэквивалентности частиц и античастиц. С другой стороны, по-видимому, не исключена возможность связать  $CP$ -несохранение с действием какого-то нового (ранее не известного) сверхслабого взаимодействия.

Какова причина или каково более глубокое физическое содержание  $CP$ -неинвариантности? Какова роль этого несохранения в микрофизике, макрофизике и астрофизике (космологии)?

Несмотря на очень большие усилия, за шесть прошедших лет ответы на эти вопросы еще не получены. Несомненно, проблема  $CP$ -несохранения одна из самых интригующих, а по всей вероятности, и самых важных в современной физике (наличие подробных обзоров<sup>19</sup> дает нам возможность ограничиться этими беглыми замечаниями).

## 12. О микрофизике вчера, сегодня и завтра

Все течет, все изменяется — меняется не только содержание той области, которая названа микрофизикой, но также и занимаемое ею место в науке вообще и в физике в частности. Достаточно просмотреть физические, реферативные и научно-популярные журналы, чтобы убедиться в следующем: удельный вес проблем микрофизики во всех этих журналах в течение последних двадцати лет сильно снизился по сравнению с предшествующими несколькими десятилетиями. К сожалению, я не располагаю точными цифрами\*), но думаю, что отношение числа научных работ по микро- и макрофизике сейчас минимум на порядок величины меньше, чем двадцать лет назад. Если воспользоваться другими показателями научной активности (число специализирующихся студентов-выпускников, число конференций и т. д.), то, вероятно, картина будет примерно такой же. В чем же здесь дело? Главная причина, как мне кажется, связана с тем, что еще в недавнем прошлом (скажем, для определенности, двадцать лет назад) микрофизика занимала некоторое совершенно исключительное место в науке.

Во-первых, проблематика микрофизики — это самые фундаментальные, принципиальные и поэтому для многих самые привлекательные вопросы физики. Во-вторых, эти же вопросы до середины нашего века одновременно имели определяющее, по существу, значение для развития всего естествознания. В самом деле, основное содержание микрофизики составляло тогда изучение атомов, а затем также атомных ядер. Разгадать строение атома, понять действующие в нем законы (для этого пришлось открыть квантовую механику!) значило дать мощнейший толчок многим областям физики, астрономии, химии, биологии. Примерно то же можно сказать об атомном ядре — его изучение породило возможность использования ядерной (атомной) энергии и даже дало известные основания называть XX век атомным веком.

Физики, занимавшиеся соответствующими проблемами микрофизики, в подавляющем своем большинстве не думали ни о каких практических плодах своей работы, а их энтузиазм и настойчивость питались интересом к проблемам как таковым, были обусловлены неугасимым стремлением

\*) В связи с этим еще раз приходится пожалеть о том, как мало внимания у нас уделяется статистическому да и любому другому анализу тенденций развития науки, роли разных форм информации и т. д. и т. п. Замечу также, что обсуждаемое изменение удельного места микрофизики нет никаких оснований связывать просто с тем обстоятельством, что основную часть атомной и ядерной физики мы отнесли к области макрофизики. Достаточно сказать, что таких разделов микрофизики, как физика высоких энергий, мезонная физика, нейтринная физика и т. п. ранее вообще не существовало. Своеобразное же место микрофизики как физического авангарда при принятии ее определении полностью сохранилось (см. также раздел 7).

узнать «как же это устроено», преодолеть трудности, добиться истины. Но концентрация усилий в целом, размах работы, поддержка и внимание общества (в частности, научного общественного мнения), все это в немалой степени диктовалось также сознанием роли микрофизики для развития естествознания в целом и, если угодно, пониманием ее общечеловеческого значения.

Сейчас же положение коренным образом изменилось. Исследуемые микрофизикой частицы либо живут ничтожные доли секунды, либо, как в случае нейтрино, почти свободно пронизывают земной шар и улавливаются лишь с колоссальным трудом. Совершенно очевидно, что научная значимость проблемы не определяется ни временем жизни частиц, ни их проникающей способностью. Характер задач, стоящих перед микрофизикой сегодня, ни в какой мере не уступает по своей жгучей таинственности и трудности проблемам ее вчерашнего дня. Иными словами, микрофизика, конечно, осталась (и при используемом ее определении всегда останется) аванпостом физики, ее самой передовой и глубокой частью. Но положение изменилось в отношении характера и роли изучаемых микрофизикой объектов. Эти объекты (атом, атомное ядро) были хлебом насущным, новые же объекты это экзотические и редкие растения. Между тем, как сказано, микрофизика занимала в науке буквально доминирующее место не в малой степени также и по причине всесторонней важности исследуемых ею вопросов.

Итак, согласно защищаемому здесь мнению, место микрофизики и в физике, и во всем естествознании радикально изменилось, и (этот пункт является особенно спорным) я думаю, что такое изменение произошло навсегда или, во всяком случае, очень надолго.

Если позволено будет выразить сказанное в ненаучных терминах, я сказал бы, что микрофизика в первой половине нашего века была первой дамой естествознания. Сегодня и завтра она остается и останется «только» самой красивой дамой. Но в том-то и дело, что разные люди могут считать разных дам самыми красивыми, первая же дама (в отличие от первых заместителей) по определению только одна (например, так называют жену президента). Позволю себе добавить, что для меня самого микрофизика была и остается самой красивой физической дамой. Но, в отличие от некоторых коллег, я лишь считаю, что поклонение не должно сопровождаться игнорированием изменений возраста и характера, а также пренебрежением к другим объектам, достойным восхищения.

Сделанные замечания представляются в достаточной мере тривиальными, но... только тем, кто с ними согласен. На деле же они здесь помещены именно потому, что являются спорными. В последнем мне пришлось убедиться, когда несколько лет назад примерно то же самое было написано по другому поводу<sup>20</sup>. Правда, как это обычно бывает, некоторые возражения и критические замечания явились лишь плодом недоразумения или эгоцентризма. Так, в утверждении об изменении и в известном отношении уменьшении роли микрофизики усмотрели если не призыв прекратить строительство мощных ускорителей и вообще всесторонней поддержки микрофизических исследований, то по крайней мере оправдание таких действий. Нечего и говорить, что я далек от подобных мыслей и в то же время боюсь, что помимо благородной заботы о развитии близкой сердцу области физики, резкость критики иногда была продиктована менее высокими чувствами, о которых здесь не место говорить.

Подлинного внимания, однако, заслуживает возражение по существу, которое сводится к следующему. На первом этапе исследований атомного ядра перспективы ядерной энергетики были еще далеко не ясны или даже оценивались совершенно неправильным образом. Таких

примеров немало. Вообще, развитие науки в конкретном плане плохо предсказуемо, а иногда и совсем непредсказуемо. Поэтому представляется возможным, а исходя из ряда аналогий даже довольно вероятным, что микрофизика еще вернет свое положение прародительницы новых гигантских задач вроде овладения ядерной энергией. Тогда, естественно, удельный вес микрофизики мог бы снова сильно увеличиться.

Само собой разумеется, что никто не возьмется полностью исключить подобную возможность. Уже одного этого обстоятельства — существования пусть самой туманной перспективы новых практически важных открытий — должно оказаться достаточным для того, чтобы продолжать всемерно развивать микрофизику не только в интересах «чистой науки».

Но, с другой стороны, даже признание возможности нового переворота в отношении практической роли микрофизики в будущем нисколько не противоречит сказанному выше относительно сегодняшнего ее места. Кроме того, непонятно, почему должно считаться ересью или признаком плохого тона предположение (которое я не боюсь высказать), что самый блистательный в каком-то смысле период в жизни микрофизики уже позади. Не все ведь обязаны верить в существование «бесконечной матрешки» — открыли одну куклу, а в ней лежит другая — и так без конца.

К сожалению, в вопросе о будущем микрофизики у меня нет никаких шансов убедиться в своей правоте, но зато и в неправоте вряд ли придется покаяться — даже оптимисты не склонны ожидать нового радикального изменения роли микрофизики в науке еще при жизни нашего поколения.

### III. АСТРОФИЗИКА

#### 13. Экспериментальная проверка общей теории относительности<sup>186, 21</sup>

Общая теория относительности (ОТО) была в законченном виде сформулирована Эйнштейном в 1915 г. К этому же времени им уже были указаны также три знаменитых («критических») эффекта, могущих служить для проверки теории: гравитационное смещение спектральных линий, отклонение световых лучей в поле Солнца и смещение перигелия Меркурия. С тех пор прошло больше полувека, но проблема экспериментальной проверки ОТО остается животрепещущей и продолжает находиться в центре внимания.

С чем это связано?

Все указанные Эйнштейном эффекты существуют и наблюдаются, но достигнутая точность еще невелика. Так, в случае гравитационного смещения частоты она составляет примерно 1%, к тому же этот эффект нечувствителен к виду теории гравитации (см. <sup>21a</sup>). Отклонение световых лучей в поле Солнца (оно, согласно ОТО, достигает 1",75 при прохождении луча непосредственно вблизи диска Солнца) измерено лишь с точностью порядка 10%, хотя в этих пределах и согласуется с ОТО. Такова же примерно точность измерения отклонения вблизи Солнца радиоволн, идущих к нам от квазаров <sup>21д</sup>, а также точность радиолокационных определений релятивистского запаздывания времени распространения сигналов вблизи Солнца <sup>21б, г, 186</sup>. Смещение перигелия Меркурия известно с точностью около 1%, и согласие теории с наблюдениями в этом вопросе еще недавно рассматривалось в качестве самого лучшего подтверждения ОТО (не говоря о точных измерениях равенства тяжелой и инертной масс <sup>21а, в</sup>). Было, однако, высказано предположение, что это согласие только кажущееся в связи с тем, что не было учтено влияние квадрупольного момента

Солнца. Такое возражение, представляющееся на первый взгляд весьма искусственным, нашло известное подтверждение в связи с обнаружением сплюснутости Солнца <sup>21в</sup>.

Итак, сейчас можно лишь утверждать, что даже для слабых полей (т. е. в случае малости параметра  $|\varphi|/c^2$ , который даже на поверхности Солнца равен  $|\varphi|/c^2 = GM_{\odot}/r_{\odot}c^2 = 2,12 \cdot 10^{-6}$ ) ОТО проверена лишь с точностью в несколько процентов. При такой ситуации имеются если не основания, то по крайней мере возможность, обсуждать альтернативные по отношению к ОТО теории гравитации. Из них наибольшее внимание привлекает сейчас тензорно-скалярная теория, в которой гравитационное поле помимо метрического тензора  $g_{ik}$  описывается также некоторым скаляром  $\chi$ . При этом релятивистское отклонение лучей должно равняться  $\alpha = (1 - s) \alpha_0$ , а смещение перигелиев планет должно быть равно  $\Psi = \left(1 - \frac{4}{3}s\right) \Psi_0$ , где  $\alpha_0$  и  $\Psi_0$  — соответствующие значения согласно ОТО (т. е. согласно теории Эйнштейна, связывающей гравитацию только с полем  $g_{ik}$ ) и  $s$  — доля веса тела, обусловленная наличием гипотетического скалярного поля  $\chi$ . Как ясно из сказанного, согласно наблюдениям  $s \ll 0,1$ , и ближайшую задачу в области экспериментальной проверки ОТО нужно видеть в повышении точности верхней границы для параметра  $s$ . Если будет показано, что  $s < 0,01$ , то тензорно-скалярная теория (по крайней мере в ее обсуждаемой форме <sup>21в</sup>) будет полностью опровергнута.

Мы не имеем возможности подробнее останавливаться на перспективах исследований в области экспериментальной проверки ОТО. Достаточно сказать, что эти перспективы, если речь идет о точностях порядка 1% и даже долей процента, являются весьма хорошими <sup>21а, б, в</sup>. Возможно, что проверка с точностью порядка процента даже уже осуществлена! Дело в том, что космические ракеты «Маринер-VI» и «Маринер-VII», запущенные в направлении Марса в 1969 г., в апреле — мае 1970 г. «зашли» за Солнце и их сигналы были использованы для измерений релятивистского запаздывания времени распространения сигналов, идущих вблизи Солнца (релятивистский эффект достигает лишь  $2 \cdot 10^{-4}$  сек). Соответствующие наблюдения сейчас обрабатываются, первые их результаты находятся в согласии с ОТО с точностью порядка 5%, но, быть может, удастся получить и более точные данные.

Если будет показано (я на это горячо надеюсь), что с экспериментальной проверкой ОТО в поле Солнца «все в порядке», то вопрос о такой проверке перейдет совсем в другую плоскость. Именно, остается вопрос о справедливости ОТО в сильных полях или вблизи, а также внутри сверхмассивных космических тел. Об этом речь пойдет ниже.

В том же случае, если бы в пределах Солнечной системы надежно удалось установить хотя бы малейшие отклонения от предсказаний ОТО, это явилось бы открытием исключительной важности. Вероятность подобного результата большинству физиков (в том числе и автору) кажется ничтожно малой. Но что такое вероятность в подобных случаях? К тому же, если такое понятие вероятности открытия все же ввести, то следовало бы пользоваться также понятием о «математическом ожидании» открытия, равном произведению вероятности на значимость открытия. В таком случае математическое ожидание для отклонений от ОТО оказалось бы значительным, даже при ничтожной вероятности обнаружить эти отклонения. Но такие рассуждения это, как говорится, филология. Совершенно очевидно, что продвинуться вперед в вопросе о проверке ОТО можно только путем новых наблюдений и измерений. Это и будет, по всей видимости, сделано в самое ближайшее время.

14. Г р а в и т а ц и о н н ы е   в о л н ы <sup>216, 22</sup>

С точки зрения любой релятивистской теории гравитационного поля должны существовать гравитационные волны в вакууме, аналогичные электромагнитным волнам. Эта аналогия в ОТО идет еще дальше, поскольку в этой теории гравитационного поля волны являются чисто поперечными. Представление о гравитационных волнах в вакууме родилось вместе с ОТО, а известная и широко используемая формула для мощности гравитационного излучения движущимися массами [см. формулу (105,12) в <sup>22а</sup>] была получена Эйнштейном еще в 1918 г. <sup>22б</sup>.

Гравитационные волны должны испускаться любыми массами с отличным от нуля и переменным во времени квадрупольным моментом. Простейшими космическими объектами такого типа являются двойные звезды или планетные системы.

Гравитационное взаимодействие является, однако, самым слабым из всех известных. Что же касается всем нам знакомых макроскопических (а можно сказать, и повседневных) проявлений гравитации, то они столь значительны просто в результате существования огромных скоплений масс и, скажем, большой массы Земли (в случае же двух протонов их гравитационное притяжение в  $e^2/GM^2 \sim 10^{36}$  раз меньше электростатического отталкивания; выше  $G = 6,67 \cdot 10^{-8} \text{ э}^{-1}\text{см}^3\text{сек}^{-2}$  — гравитационная постоянная,  $e = 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ CGSE}$  — заряд протона и  $M = 1,67 \cdot 10^{-24} \text{ э}$  — его масса). Поэтому не слишком удивителен тот факт, что мощность гравитационного излучения обычно (скажем, в случае двойных звезд) сравнительно невелика, а детектирование гравитационных волн весьма не просто. Так или иначе, с полной уверенностью гравитационные волны еще не обнаружены, и перспективы приема гравитационных волн от двойных звезд и пульсаров представляются весьма отдаленными. Достаточно сказать, что если бы пульсар NP0532 в Крабовидной туманности даже излучал гравитационные волны с мощностью  $L_g \sim 10^{38} \text{ эрг/сек}^*$ , то поток гравитационного излучения на Земле составил бы только  $F_g \sim 3 \times 10^{-7} \text{ эрг/см}^2\text{сек}$ . Между тем чувствительность существующих приемников гравитационных волн порядка или меньше  $F_g \sim 10^4 \text{ эрг/см}^2\text{сек}$ , т. е. по крайней мере на 11 порядков меньше, чем нужно (см. <sup>216, 22в</sup>). Для приема излучения с  $F_g \sim 3 \cdot 10^{-7} \text{ эрг/см}^2\text{сек}$  известными сейчас способами нужно охладить приемник весом в несколько тонн до температуры в  $10^{-2} - 10^{-3} \text{ }^\circ\text{K}$ . Это возможно, но, конечно, крайне трудно. И тем не менее одной из важнейших сенсаций сегодняшнего дня является именно утверждение о приеме космического гравитационного излучения <sup>22в</sup>. Конкретно, в <sup>22в</sup> считается, что массивные алюминиевые «болванки» (цилиндры) весом в 1,5 тонны начинают вибрировать с их собственной частотой  $\nu \sim 10^3 \text{ гц}$  под влиянием гравитационного излучения, приходящего в направлении на центр Галактики. Мощность этого излучения, если оно действительно испускается вблизи галактического центра (расстояние около  $10^4 \text{ пс} \approx 3 \cdot 10^{22} \text{ см}$ ) должна достигать от  $10^{50} \text{ эрг/сек}$  (оценка в <sup>22в</sup>) до  $10^{52}$  и более (согласно <sup>216, 22г</sup>). Энергия, отвечающая массе покоя Солнца,  $M_\odot c^2 \sim 10^{54} \text{ эрг}$ ; следовательно, если из центра Галактики действительно исходит излучение с мощностью  $10^{50} - 10^{52} \text{ эрг/сек}$ , то масса этой центральной области должна за год уменьшаться на  $(3 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^5) M_\odot$  только за счет гравитационного излучения. В существование столь мощного гравитационного излучения трудно поверить, хотя оно еще не противоречит про-

\*) Такова светимость Крабовидной туманности во всех частях электромагнитного спектра, вместе взятых. По моему мнению, нет никаких оснований ожидать, что мощность гравитационного излучения пульсаров достигает подобного значения; вероятно, эта мощность на несколько порядков меньше.

стым энергетическим соображениям (масса всей нашей Галактики  $M_g \sim (1-3) \cdot 10^{11} M_\odot$ ). Вопрос о возможном механизме такого излучения остается открытым, и, что еще важнее, измерения проведены лишь одной группой <sup>22в</sup> и их интерпретация вызывает некоторые возражения <sup>21б, 22г</sup>. Тем самым нет сомнений как в необходимости продолжать исследование, так и в том, что еще преждевременно делать какие-либо далеко идущие выводы. Вместе с тем следует подчеркнуть, что благодаря работам <sup>22в</sup> проблема приема гравитационных волн из стадии обсуждений перешла, наконец, в экспериментальную фазу \*). В любом случае это немалое достижение, а если действительно обнаружено мощное гравитационное излучение, то речь уже идет о замечательном и важнейшем открытии.

### 15. Космологическая проблема.

О сингулярностях в общей теории относительности и космологии <sup>22а, 23, 24</sup>

Задача космологии — изучение пространства-времени «в большом» — в больших масштабах, за длительное время. Тем самым космология неразрывно связана со всей внегалактической астрономией и охватывает весьма широкую область исследований. Но «вопросом вопросов» в космологии является выяснение самого характера эволюции Вселенной во времени, выбор отвечающей действительности космологической модели (здесь мы предполагаем, что основные понятия и вехи на пути развития современной космологии известны читателям — на это дает известное право, в частности, возможность отослать к элементарной статье <sup>23</sup>, а также к другим источникам <sup>22а, 24</sup>).

В однородных и изотропных космологических моделях (они впервые были рассмотрены Фридманом в 1922 и 1924 гг., а затем исследовались Леметром и многими другими \*\*)). Вселенная в согласии с данными наблюдений представляет собой расширяющуюся систему. Любопытно, что лишь в 1934 г. Милн и Маккри поняли природу такой нестационарности, носящей классический характер, т. е. при известном подходе вытекающей уже из ньютоновской теории тяготения (дело сводится просто к тому, что при наличии только сил тяготения, отвечающих притяжению, система тел не может оставаться в покое и вообще в стационарном состоянии).

Независимо от природы расширения совершенно ясно, что в прошлом оно не могло продолжаться вечно. И действительно, во всех однородных и изотропных моделях расширение либо когда-то возникало после фазы сжатия, либо начиналось в некоторый момент  $t = 0$ , когда плотность вещества  $\rho$  была бесконечна (сингулярность). При этом, если космологическая постоянная  $\Lambda = 0$ , все решения принадлежат к последнему классу — обладают сингулярностью (те же решения с  $\Lambda \neq 0$ , которые не имеют сингулярности, не находятся в согласии с данными наблюдений <sup>24в</sup>).

Появление сингулярности ( $\rho \rightarrow \infty$ ) логически допустимо, но, по мнению очень многих (в том числе и моему), является указанием на какое-то неблагоприятное, неприменимое или ограниченное теории и т. п.

\*) Сейчас уже в нескольких странах предпринимаются попытки повторить измерения <sup>22в</sup>, причем одновременно с импульсами гравитационных волн будут фиксироваться другие события (радиоимпульсы, ливни космических лучей).

\*\*) Точнее, первая релятивистская космологическая модель, и при этом модель изотропная и однородная, была предложена Эйнштейном в 1917 г. (см. <sup>22б</sup>, стр. 601). Эта модель, однако, была статической. Она отвечает одному решению из двухпараметрического семейства решений (во всех других случаях нестационарных), которые были найдены Фридманом. Заметим, что Фридман не считал нулем введенную Эйнштейном космологическую постоянную  $\Lambda$ . При  $\Lambda = 0$  нестационарны все однородные и изотропные модели.

Одно время была надежда на то, что сингулярность во фридмановских моделях появляется в силу их высокой симметрии, но такая сингулярность исчезнет в неоднородных и анизотропных космологических моделях, подобно тому как фокус высокосимметричной линзы размывается при ее искажении. В последнее время выяснилось, однако, что это не так <sup>24г</sup>: весьма общие решения ОТО, отвечающие космологическим моделям и являющиеся анизотропными и неоднородными, также имеют сингулярную точку (приближение к этой точке, вообще говоря, носит весьма своеобразный осциллирующий характер).

Итак, в рамках ОТО освободиться от сингулярностей в задачах о космологическом расширении (или о коллапсе сверхмассивных звезд; см. следующий раздел), видимо, не представляется возможным\*). Но это еще отнюдь не является решающим свидетельством в пользу существования истинных сингулярностей с  $\rho \rightarrow \infty$ . Дело в том, что ОТО — это классическая теория. Между тем не приходится сомневаться в том, что истинная теория гравитационного поля должна быть квантовой теорией. Обычно квантовые эффекты в астрофизике крайне малы, как и для большинства макроскопических задач, но как раз вблизи сингулярности квантовые эффекты сильно возрастают. Представим себе, например, что существует фундаментальная длина  $l_0$  (см. раздел 9). Тогда представляется почти несомненным, что классическая ОТО перестает «работать» для масштабов порядка или меньших  $l_0$  и, вероятно, для плотностей\*\*  $\rho \gtrsim \rho_0 \sim \hbar/c l_0^4$ . При  $l_0 \sim 10^{-16} - 10^{-20}$  см плотность  $\rho_0 \sim 10^{26} - 10^{40}$  г/см<sup>3</sup>. Можно думать, что в этом случае плотности  $\rho \gtrsim \rho_0$  недостижимы и сингулярность, как и все расходящиеся, исчезает. Если же никакой фундаментальной длины  $l_0$ , не связанной с гравитацией, не существует, то все равно на сцену выступает некоторая гравитационная длина  $l_g$  (возможно, что эта длина и играет роль фундаментальной длины  $l_0$ ). В самом деле, из гравитационной постоянной  $G$  [г<sup>-1</sup> см<sup>3</sup>сек<sup>-2</sup>], скорости света  $c$  и квантовой постоянной  $\hbar$  можно образовать длину

$$l_g \sim \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} \approx 1,6 \cdot 10^{-33} \text{ см.} \quad (4)$$

Этой длине отвечают время  $t_g \sim c/l_g \approx 0,5 \cdot 10^{-43}$  сек и плотность

$$\rho_g \sim \frac{c^5}{\hbar G^2} = \frac{\hbar}{c l_g^4} \approx 5 \cdot 10^{93} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}. \quad (5)$$

Различные соображения и оценки <sup>24д, е</sup> свидетельствуют о том, что с учетом квантовых эффектов плотность  $\rho$  по порядку величины не может превосходить  $\rho_g \sim 10^{94}$  г·см<sup>-3</sup>, и во всяком случае классические сингулярные решения ОТО нельзя экстраполировать в область больших плотностей. Но соответствующие аргументы все же не являются строгими, ибо последовательная квантовая теория гравитации, не говоря уже о квантовой космологии, еще не создана. Решение этой задачи, по-видимому, исключительно трудное дело, но вместе с тем необходимое и глубоко принципиальное.

Космологическая проблема и связанный с ней вопрос о сингулярностях в ОТО занимает в астрономии по своему характеру и типу задач примерно такое же место, как микрофизика в физике. К тому же здесь,

\*) Сказанное не относится к системам с неравным нулю полным электрическим или мезонным зарядом (речь идет о полях векторных мезонов; см. <sup>24ж</sup>).

\*\*\*) Из квантовой постоянной  $\hbar$  с размерностью [г·см<sup>2</sup>сек<sup>-1</sup>], скорости света  $c$  [см·сек<sup>-1</sup>] и длины  $l_0$  [см] можно составить только одну указанную величину  $\rho_0$  с размерностью [г·см<sup>-3</sup>].



по-видимому, проблемы микромира смыкаются даже не с макрофизикой, а с астрофизикой, с космологией. По всей вероятности, для понимания этих вопросов нужны новые идеи; это область исканий, ошибок, попыток и новых попыток найти правильный путь.

## 16. Квазары и ядра галактик

Можно ли ожидать отступлений от классических решений ОТО где-либо или когда-либо в космосе помимо ранних (в смысле близости к классической сингулярности) фаз эволюции Вселенной? Такой вопрос может быть расширен, если вместо отступления от ОТО речь идет о более общей возможности отхода от уже известных физических законов.

В каком-то смысле это, видимо, извечный и довольно многих астрономов волнующий вопрос: сводится ли все в астрономии к «земной» физике, к действующей в наших лабораториях физике? Аналогичный вопрос многие годы обсуждается в применении к биологии — сводится все в биологии к физике, к молекулярным представлениям, или нет? \*).

Дать на подобные вопросы априорный ответ, конечно, нельзя. Подход, который представляется самым естественным (и который фактически наиболее распространен) можно сформулировать так: давайте применять известную физику без ограничений; если же на этом пути встретятся действительно непреодолимые трудности, то мы будем готовы проанализировать новые представления, пойти на какую-то ломку или обобщение физических теорий. Вероятно, с такой формулировкой согласятся почти все, но это еще далеко не означает единства взглядов, ибо все дело в том, когда же считать трудности непреодолимыми?

Физики, занимающиеся астрономией, в этом отношении значительно более консервативны (как я убежден, в хорошем смысле этого слова), чем «чистые» астрономы. Складывается впечатление, что у некоторых астрономов имеется буквально какая-то внутренняя потребность освободиться от физических пут, выйти на простор исканий, не ограниченных никакими известными физическими законами. Приведем, например, такое замечание Джинса <sup>25a</sup>: «Каждая неудача при попытках понять происхождение спиральных ветвей делает все более и более трудным делом противостоять подозрению, что в спиральных туманностях действуют совершенно неизвестные нам силы, быть может, отражающие новые и неожиданные метрические свойства пространства. Предположение, которое настоятельно возникает, состоит в том, что центры туманностей имеют характер «сингулярных точек». В этих точках материя втекает в наш мир из некоторого иного и совершенно постороннего пространства. Тем самым обитаемую нашего мира сингулярные точки представляются местами, где непрерывно рождается материя».

На эти взгляды Джинса сейчас часто ссылаются чуть ли как не на пророчество. Но ведь опубликованы они были в 1928 г., когда о строении галактик было не так уж много известно, а теория их эволюции практически совсем еще не была развита (к тому же сейчас вопрос о происхождении спиральных ветвей считается в значительной мере выясненным).

В настоящее время мы знаем о галактиках несравненно больше; в частности, установлен факт существования у них некоторого ядра, которое иногда активно и играет большую роль <sup>25б, в, г</sup>. Но следует ли отсюда также гораздо более радикальные предположения Джинса <sup>25a</sup>

\*) Эволюция взглядов в этом вопросе состоит, в общем, во все большем, а часто и неограниченном расширении «радиуса действия» физики в биологии. Поучительно изменение взглядов Бора на этот счет (см. <sup>20</sup> и указанные там ссылки).

и Амбарцумяна <sup>25б</sup> о роли ядер как источников вещества или о том, что эти ядра «представляют собой новую форму существования материи, возможно, вовсе не известную современной физике» <sup>25в</sup>?

По мнению большинства астрофизиков это не так, и далеко еще не исключена возможность объяснить все наблюдаемые в галактиках и их ядрах, а также в квазарах <sup>25д</sup> явления, не прибегая к существенно новым представлениям (см. однако, <sup>25з</sup>). Галактические ядра и квазары вполне могут представлять собой или иметь в своей центральной части сверхмассивные плазменные тела ( $M \sim 10^9 M_{\odot}$ ,  $r \sim 10^{17}$  см) с большими внутренними движениями вращательного типа и магнитными полями <sup>25е</sup>.

Вместе с тем сделанная выше ссылка на «большинство» невольно заставляет вспомнить Галилея, подчеркивавшего, что в вопросах науки мнение одного бывает иногда дороже мнения тысячи. Поэтому я меньше всего собираюсь использовать пресловутое «большинство» в качестве аргумента в пользу неограниченного применения известных нам физических законов; речь идет только о констатации сложившейся ситуации. Последняя (если она правильно здесь отражена) сводится к тому, что даже «астрономическое общественное мнение», не говоря уже о «физическом общественном мнении», еще ни в какой мере не признало убедительность доводов в пользу необходимости вводить существенно новые физические представления для понимания процессов в ядрах галактик и в квазарах.

Что же касается возможного присутствия в галактических ядрах <sup>25и</sup> и вообще в космосе сколлапсировавших масс, то такие предположения не выводят нас за пределы ОТО. Возникающие же при релятивистском коллапсе сингулярности (где ОТО, как и в случае космологической сингулярности, вероятно, неприменима) во внешнем пространстве никак специфически не проявляются (см. <sup>22а</sup>, <sup>24б</sup>).

Особо нужно упомянуть проблему происхождения и возникновения галактик и квазаров <sup>25ж</sup>, которая тесно связана как с космологией, так и, конечно, с вопросом о природе галактических ядер и квазаров.

Итак, ядра галактик и квазары представляют собой те области, где подозревают существование отклонений от известных физических законов (ОТО, квантовая теория, закон сохранения числа барионов и т. д.). Проверка такой возможности, даже не говоря о создании более полной теории галактических ядер и квазаров, составляет проблему выдающегося значения.

## 17. Нейтронные звезды и пульсары

Гипотеза о существовании нейтронных звезд была, насколько удалось установить, высказана <sup>26а</sup> в 1934 г. и затем широко обсуждалась многие годы <sup>26б</sup>, <sup>в</sup>, <sup>24б</sup>, но лишь в теоретическом аспекте. Попытки обнаружить нейтронные звезды сначала казались почти безнадежными \*); потом появились надежды заметить такие звезды, пока они горячи ( $T \sim 10^6 - 10^7$  градусов), по их рентгеновскому излучению. Фактически же нейтронные звезды были открыты в 1967—1968 гг. по их специфическому периодическому радиоизлучению: мы имеем в виду обнаружение пульсаров, идентификация которых с нейтронными звездами сейчас общепринята <sup>26г</sup>, д; <sup>23</sup>. С изучением нейтронных звезд и пульсаров (знак равенства здесь все же ставить нельзя, тем более, что не все нейтронные звезды

\*) Радиус нейтронной звезды  $r_0 \sim 10 - 30$  км, т. е. на пять порядков величины меньше радиуса Солнца  $r_{\odot} = 7 \cdot 10^5$  км. Поэтому при такой же, как у Солнца, температуре  $T_{\odot} \sim 6000^\circ$  нейтронная фотосфера излучала бы на 10 порядков меньше света, чем Солнце.

обязаны давать наблюдаемое пульсирующее излучение) связано очень большое число проблем. Но то же самое можно сказать о звездах любого класса. Поэтому нейтронные звезды и пульсары фигурируют в настоящем «списке важнейших проблем» в силу специальных обстоятельств, которых несколько.

Во-первых, большая часть нейтронной звезды состоит из вещества с плотностями, лежащими в пределах от  $10^{11}$  до  $10^{15}$  г/см<sup>3</sup>. Уравнение состояния и все свойства вещества при таких плотностях плохо известны, и его изучение составляет немаловажную задачу. Особо здесь можно отметить вопрос о сверхтекучести нейтронной жидкости и сверхпроводимости протонной жидкости в нейтронных звездах<sup>56, 26д</sup> (при плотностях  $\rho \sim 10^{13} - 10^{15}$  г/см<sup>3</sup> протоны и, конечно, электроны примешаны к нейтронам в количестве нескольких процентов; поскольку нейтроны, протоны и электроны в таких условиях образуют вырожденные ферми-системы, в некотором приближении оказывается возможным считать такую смесь как бы состоящей из независимых нейтронной, протонной и электронной ферми-жидкостей).

Во-вторых, остается неясным вопрос о центральной области нейтронных звезд, где при плотностях  $\rho \gtrsim 10^{15}$  (если такая плотность достигается, что зависит от массы звезды) помимо нуклонов и электронов в заметном количестве появляются мезоны и гипероны, в силу чего уравнение состояния совсем уже плохо известно.

Если говорить не о гипотетических состояниях типа области вблизи сингулярностей (космология, коллапс), то в центральных районах нейтронных звезд плотность вещества наибольшая, встречающаяся в природе. Это замечание, как можно думать, говорит само за себя. Добавим, что гравитационные поля в нейтронных звездах также наибольшие (опять же за исключением полей, с которыми приходится, пока лишь в теории, иметь дело при анализе космологической проблемы и коллапса). Тем самым ясно, что отклонения от ОТО, если они имеют место и притом при плотностях, существенно меньших плотности  $\rho_g \sim 10^{94}$  г/см<sup>3</sup> [см. (5)], должны были бы проявиться в первую очередь для нейтронных звезд\*).

В-третьих, остаются еще недостаточно ясными электродинамика пульсаров и механизм их излучения. Эти проблемы содержат столь сложные элементы (см. 26д), что их нельзя не отнести к числу «важных и интересных».

Итак, нейтронные звезды и пульсары — это один из фокусов (в смысле фокуса лучей, а не результата ловкости рук) в современной физике и астрономии; их исследование будет, вероятно, оставаться в центре внимания еще многие годы.

## 18. Происхождение космических лучей и космического гама- и рентгеновского излучения

Уже более пятидесяти лет назад было установлено, что на Землю из космоса приходит сильно проникающее излучение — космические лучи. Природа (состав) этого излучения долгие годы оставалась неясной. Но сейчас известно, что космические лучи — это заряженные частицы:

\*) В разделе 15 указывалось, что в случае существования фундаментальной длины  $l_0$  известные законы могут начать нарушаться при плотностях  $\rho_0 \sim \hbar/cl_0^3$ . Поскольку в атомных ядрах  $\rho_n \sim 3 \cdot 10^{14}$ , а резких аномалий «фундаментального типа» не наблюдается, приходим к оценке  $l_0 \leq \left(\frac{\rho_n c}{\hbar}\right)^{1/3} \sim 10^{-13}$  см, в которой трудно сомневаться и из более убедительных соображений (как указывалось, сейчас считают, что  $l_0 \leq 10^{-16} - 10^{-20}$  см).

протоны, ядра, электроны и позитроны. Правда, из космоса к нам приходят также рентгеновские и гамма-лучи и, несомненно, нейтрино. Сейчас принято, однако, называть космическими лучами только заряженные частицы космического происхождения (такое условие тем более оправдано, что в области больших энергий роль заряженных частиц является доминирующей, например, по величине потока или энерговыделению). Проблема происхождения космических лучей дискутируется десятилетиями<sup>23, 27</sup>, но остается достаточно «важной и интересной», поскольку споры на этот счет продолжаются, а большое значение самого вопроса не вызывает сомнений.

Основным для проблемы происхождения космических лучей представляется в настоящее время выбор между тремя моделями: метагалактической, галактической с гало́ и дисковой галактической моделями. В метагалактических моделях основная часть принимаемого на Земле космического излучения приходит из Метагалактики, т. е. втекает в Галактику извне. В галактических же моделях считается, что космические лучи образуются в самой Галактике, в первую очередь при взрывах сверхновых звезд и вблизи пульсаров, находящихся в оболочках сверхновых. По моему убеждению, только галактические модели являются приемлемыми и основной вопрос сейчас состоит в выборе между моделью с гало́ и дисковой моделью. В первой из этих моделей космические лучи заполняют квазисферическое гало́ с характерным размером  $R \sim 5 \cdot 10^{22}$  см; во второй (дисковой) модели они сосредоточены в диске (радиус  $R \sim 5 \cdot 10^{22}$  см, толщина  $h \sim 3 \cdot 10^{21}$  см). Различие между моделями сильнее всего сказывается на среднем времени жизни космических лучей в Галактике: это время  $T \sim 10^8$  лет для модели с гало́ и  $T \sim (1-3) \cdot 10^6$  лет для дисковой модели.

Помимо выбора между моделями проблема происхождения космических лучей имеет, конечно, и ряд других сторон. Упомянем о плазменных явлениях в астрофизике, механизмах ускорения частиц при взрывах сверхновых звезд и вблизи пульсаров, солнечных космических лучах и их распространении в Солнечной системе<sup>27г</sup>, проблемах химического состава космических лучей и энергетического спектра различных их компонент, включая электронно-позитронную. Особо нужно выделить область сверхвысоких энергий  $E \gtrsim 10^{17}-10^{18}$  эв. Происхождение космических лучей с такой энергией (наблюдаются частицы с энергией, достигающей  $3 \cdot 10^{19}-10^{20}$  эв) является сейчас совершенно не ясным.

Астрофизика космических лучей — порождение послевоенной астрофизики и занимает в ней все более заметное место. Последнее время, впрочем, чаще говорят не об астрофизике космических лучей, а об астрофизике высоких энергий, к которой относятся также вопросы рентгеновской и гамма-астрономии (сюда следует присоединить и астрономию нейтрино высоких энергий).

Происхождение космических рентгеновских и гамма-лучей выяснено еще в совершенно недостаточной мере<sup>27а, б, в, д, е</sup>. Известен целый ряд механизмов рентгеновского и гамма-излучения, но какой же из них является определяющим в Метагалактике, Галактике и в рентгеновских «звездах»? Далее, рассеяние релятивистских электронов на радиодетонах, составляющих реликтовое тепловое излучение, является одним из источников рентгеновских лучей (гамма-лучи образуются скорее при рассеянии релятивистских электронов на инфракрасных и оптических фотонах, поскольку электронов с очень высокими энергиями в космосе мало). С другой стороны, такое рассеяние служит одной из самых эффективных причин замедления электронов. До недавнего времени казалось, что реликтовое тепловое излучение (оно было обнаружено в 1965 г.) можно, по всей

вероятности, считать тепловым (черным) излучением с температурой  $2,7^\circ \text{K}$ . Но область спектра с длинами волн короче  $2-3 \text{ мм}$  оставалась не обследованной, и сейчас появились некоторые указания на присутствие в этой субмиллиметровой части спектра какого-то дополнительного мощного излучения. Существует ли это излучение, каково его происхождение? Эти вопросы тоже не ясны.

В общем некоторые аспекты рентгеновской и гамма-астрономии, безусловно, упомянуты здесь с достаточным основанием.

### 19. Нейтринная астрономия

Гипотеза о существовании нейтрино была высказана Паули в 1931 г. Только через четверть века — срок немалый в наше бурное время — нейтрино удалось зарегистрировать вблизи ядерных реакторов. Естественно возник и такой вопрос: нельзя ли также регистрировать нейтрино внеземного происхождения?

Поскольку источниками звездной энергии являются ядерные реакции, совершенно очевидно, что нейтрино должны испускаться всеми звездами. В первую очередь речь идет, конечно, о Солнце (расстояние от Земли до Солнца составляет  $1,5 \cdot 10^{13} \text{ см}$ , а до ближайших звезд оно порядка  $4 \cdot 10^{18} \text{ см}$ ; отсюда ясно, что «при прочих равных условиях» поток солнечных нейтрино должен быть в  $10^{11}$  раз больше их потока от ближайших звезд). Попытки детектировать солнечные нейтрино предпринимаются уже несколько лет <sup>28а</sup>, но пока не привели к положительным результатам. Впрочем, даже уточнение верхнего предела нейтринного потока оказалось весьма ценным. В близком будущем можно ожидать регистрации солнечных нейтрино простейшим способом (речь идет об использовании в качестве поглотителя нейтрино изотопа  $^{37}\text{Cl}$ ), а затем будут, по всей вероятности, производиться попытки использования и других детекторов (например,  $^7\text{Li}$ ) с другими порогами реакции. Зарождение нейтринной астрономии — большое событие, поскольку прием нейтрино — это единственный известный способ заглянуть в центральные области звезд.

Надеяться на возможность приема нейтрино от «обычных» звезд в обозримое время довольно трудно. Другое дело вспышки сверхновых звезд и образование нейтронных звезд <sup>\*</sup>), при которых могут возникать мощные потоки нейтрино <sup>18е, 24б, 27б, 28б</sup>. То же можно сказать о пока еще несколько гипотетических событиях — коллапсе сверхмассивных звезд (в том числе галактических ядер). Наконец, исключительно важно было бы зарегистрировать нейтрино, образовавшиеся на ранних стадиях эволюции Вселенной <sup>24б, 28б, в</sup>. К сожалению, перспективы в этом отношении пока не слишком радужные (чувствительность известных детекторов нужно повысить на несколько порядков величины). Однако как раз в отношении перспектив усовершенствования методов измерений пессимизм, как нас учит история физики и астрономии, меньше всего оправдан. К тому же существующие оценки интенсивности «космологических» нейтрино могут оказаться заниженными. Ко всем этим направлениям нейтринной астрономии примыкают уже упоминавшиеся в разделе 10 (см. <sup>18л, 27б</sup> и <sup>28б, г</sup>) исследования нейтрино высоких энергий. Итак, нейтринная астрономия «стучится в дверь»; она представляет собой одну из самых интересных новых областей научных исследований, обещающую принести ценные результаты, а быть может, и открытия.

<sup>\*</sup>) Вполне возможно, что это одно и то же, но, в принципе, вспышка сверхновой может приводить также к образованию белого карлика, сколлапсировавшего объекта или к полному исчезновению звезды.

## 20. Несколько замечаний о развитии астрономии

Только за десять последних лет в астрономии сделано пять открытий первостепенного значения (кварзары, реликтовое тепловое излучение, рентгеновские «звезды», космические мазеры на линиях молекул  $\text{OH}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и др., пульсары), не говоря уже о многих крупных достижениях несколько меньшего масштаба. В физике за тот же период можно указать, пожалуй, только на два события сопоставимой важности — открытие различия между электронными и мюонными нейтрино и обнаружение нарушения  $CP$ -инвариантности. Если отнести к астрономии также часть достижений в области космических исследований (изучение Луны и планет), то победное шествие астрономии в наши дни станет еще более впечатляющим.

Различные научные направления, если говорить о качественной стороне дела, развиваются неравномерно. Конкретно, можно констатировать, что астрономия после второй мировой войны вступила в период особенно блистательного развития, в период второй астрономической революции (первая такая революция связывается с именем Галилея, начавшего использовать телескопы). Об этом автору (как и многим другим) не раз уже приходилось писать<sup>23</sup>, но астрофизическую часть настоящей статьи также кажется необходимым закончить несколькими замечаниями на этот счет.

Во-первых, успехи астрономии, несомненно, обусловлены развитием физики и космической техники, позволившими использовать фантастически чувствительную аппаратуру и поднимать ее за пределы атмосферы. Во-вторых, содержание второй астрономической революции можно видеть в процессе превращения астрономии из оптической во всеволновую.

В-третьих, как ни замечательны последние астрономические открытия, но они еще не вывели нас за пределы известных физических представлений и законов, не заставили что-либо пересмотреть в фундаменте физики.

Что будет дальше, какова тенденция развития астрономии? Пытаться дать ответ на такие вопросы очень рискованно. Но, как мне кажется, лучше ошибиться, чем молчать из осторожности. Поэтому позволю себе сделать некоторый прогноз, впрочем, мало на что претендующий.

Можно думать, что в настоящем десятилетии (или, максимум, лет через пятнадцать) вторая астрономическая революция завершится — астрономия станет всеволновой, а те открытия, которые в каком-то смысле «лежали на поверхности», будут сделаны. После этого должен наступить более спокойный период (речь идет об изучении далеких объектов; исследования планет и проблемы внеземных цивилизаций мы здесь не касаемся). Другими словами, пройдет героический период и в астрофизике произойдут изменения (дасть лишь на время), в некоторой мере аналогичные наблюдающимся сейчас в микрофизике (см. раздел 12). Впрочем, нельзя не отметить, что у астрономии имеются богатые резервы, связанные с возможностью расцвета нейтринной астрономии и астрономии гравитационных волн.

Наконец, главный вопрос (главный, по крайней мере, с точки зрения физиков): приведет ли астрономия к столь желанному для ряда ее представителей изменению фундаментальных физических представлений? Примерами таких изменений могли бы явиться необходимость введения скалярного поля в релятивистскую теорию тяготения, обнаружение изменения физических констант со временем или отклонений

от известных физических законов при больших плотностях внутри или вблизи огромных масс (ядра галактик, квазары, нейтронные звезды) и т. п.

Поиски новых фундаментальных идей и представлений в астрономии (включая космологию) заслуживают, конечно, самого пристального внимания, но по самой сути дела предвидеть здесь ничего не дано. Тем самым поставленный выше «главный вопрос» остается без ответа. Могу лишь отметить, что сам я нисколько не был бы удивлен (и более того, склонен верить именно в такую возможность), если бы «новая» физика в астрономии понадобилась бы только вблизи классических сингулярностей, т. е. оказалась существенной лишь в космологии и для понимания заключительной фазы гравитационного коллапса.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Условность и спорность любого «списка особенно важных и интересных проблем», как можно надеяться, уже достаточно подчеркивалась. Очевидно также, что различные темы далеко не равноценны по своему значению и что любой такой «список» изменяется со временем. Если бы, например, был получен хотя бы один сверхпроводник с комнатной критической температурой и понятно, за счет каких факторов это достигнуто, то проблему высокотемпературной сверхпроводимости скорее всего можно было бы из «списка» исключить. Так же нужно поступить, если будет получен отрицательный ответ на поставленный вопрос; скажем, выяснится, что высокотемпературные сверхпроводники нельзя создать или что долгоживущих сверхтяжелых ядер не существует.

Наконец, во избежание недоразумения, могущего возникнуть у начинающих физиков, следует отметить, что заниматься вопросами, не включенными в «список», также совершенно необходимо. Не говоря уже об отсутствии сколько-нибудь жестких перегородок между множеством различных физических и технических вопросов, исследований и разработок, достаточно вспомнить о том, как рождается новая «особенно важная проблема». В большинстве случаев ее родителями, как и источниками или причинами открытий, являются «рядовые» проблемы, подобно тому как гении рождаются у обыкновенных родителей. Вряд ли кто-либо назвал бы в тридцатые годы особенно важным изучение люминесценции жидкостей под влиянием гамма-лучей. Но именно на этом пути был открыт эффект Вавилова — Черенкова. То же можно сказать об эффекте Мёссбауэра, ряде последних астрономических открытий (например, обнаружении пульсаров) и т. д.

Иными словами, многие замечательные открытия и научные достижения оказываются непредвиденными и неожиданными.

Таким образом, если определенная концентрация внимания на известных особенно важных проблемах сегодняшнего дня естественна и разумна, то это никак не должно приводить к забвению других направлений и негармоничному развитию физики и астрофизики в целом.

---

В заключение пользуюсь возможностью поблагодарить за замечания всех, кто прочел статью в рукописи — их имена не названы, чтобы тем самым хотя бы косвенно не возложить на них ответственность за содержание и недостатки статьи.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА \*)

1. Квантовая электроника. Маленькая Энциклопедия, М., «Советская Энциклопедия», 1969.
2. а) Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций, т. I — IV, М., Изд-во АН СССР, 1958. б) А. С. Бишоп, Программа США по управляемому термоядерному синтезу, М., Атомиздат, 1960. в) А. Д. Сахаров, УФН 93, 564 (1967). г) В. Л. Гинзбург, Тр. ФИАН СССР 18, 55 (1962).
3. а) Л. А. Арцимович, Управляемые термоядерные реакции, М., Физматгиз, 1963 (популярное изложение: «Элементарная физика плазмы», М., Атомиздат, 1969). б) Р. Пост, Высокотемпературная плазма и управляемые термоядерные реакции, М., ИЛ, 1961; см. также УФН 92, 321 (1967). в) Л. А. Арцимович, УФН 91, 365 (1967). г) Б. Б. Кадомцев, УФН 91, 381 (1967); 97, 363 (1969).
4. В. Л. Гинзбург, УФН 95, 91 (1968); 101, 185 (1970) (популярное изложение: «Природа», № 7, 11 (1969)).
5. а) T. Schneider, Helv. Phys. Acta 42, 957 (1969). б) В. Л. Гинзбург, УФН 97, 601 (1969). в) Sci. News 97, 623 (1970).
6. а) Б. В. Дерягин и Н. Н. Федякин, ДАН 147, 403 (1962); 182, 1300 (1968); Б. В. Дерягин, УФН 100, 726 (1970). б) E. R. Lippincott, R. R. Stomberg, W. H. Grant, G. L. Cessac, Science 164, 1482 (1969). в) J. Middleharst, L. R. Fisher, Nature 227, 57 (1970). г) A. G. Leiga, D. W. Vance, A. T. Ward, Science 168, 114 (1970); S. L. Kurtin, C. A. Mead, W. A. Mueller, B. S. Kurtin, Science 167, 1720 (1970); D. L. Rousseau, S. P. S. Porto, Science 167, 1715 (1970); V. V. Morariu, R. Mills, L. A. Woolf, Nature 227, 374 (1970); S. W. Rabideau and A. E. Florin, Science 169, 48 (1970). д) L. C. Allen, P. A. Kollman, Science 167, 1443 (1970); С. Т. О'Конски, Science 168, 1089 (1970).
7. K. Vonnegut, Cat's Cradle. Penguin Books (1965) (см. перевод: К. Вонегат, Колыбель для кошки, М., «Молодая гвардия», 1970).
8. Л. В. Келдыш, УФН 100, 514 (1970).
9. а) Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, Статистическая физика, гл. XIV, М., «Наука», 1964. б) Л. P. Kadanoff и др. Rev. Mod. Phys. 39, 395 (1967). в) В. Л. Гинзбург, ФТТ 2, 2031 (1960). г) В. Л. Покровский, УФН 94, 127 (1968). д) В. Л. Гинзбург, Л. П. Питаевский, ЖЭТФ 34, 1240 (1958); Ю. Г. Мамаладзе, ЖЭТФ 52, 729 (1967). е) И. А. Яковлев, Т. С. Величкина, УФН 63, 411 (1957); В. Л. Гинзбург, УФН 77, 621 (1962); А. П. Леванюк, А. А. Собянин, ЖЭТФ 53, 1024 (1967). ж) S. M. Shaprio, H. Z. Cummins, Phys. Rev. Lett. 21, 1578 (1968). з) L. Reatto, Journ. Low Temper. Phys. 2, 353 (1970).
10. а) Г. Н. Флеров, В. А. Друин, А. А. Плевае, УФН 100, 45 (1970). б) A. Ghiorso, M. Nurmis, J. Haggis, K. Eskola, P. Eskola, Phys. Rev. Lett. 22, 1317 (1969); 24, 1498 (1970). в) Г. Сиборг, Д. Блум, УФН 101, 755 (1970).
11. А. Эйнштейн, Собрание научных трудов, т. II, М., «Наука», 1966, стр. 406.
12. а) В. Вайскопф, УФН 96, 673 (1968). б) А. Пайс, УФН 97, 131 (1969). в) Л. Альварес, УФН 100, 93 (1970). г) Природа материи, УФН 86 (4), 591 (1965). д) М. А. Марков, Преприят ОИЯИ, Дубна (1970). е) N. Barash-Schmidt и др. Review of Particle Properties. Rev. Mod. Phys. 49, 109 (1969).
13. а) В. И. Манько, А. А. Комар, УФН (в печати). б) Supplement of the Progress Theor. Phys., No. 41 (1968).
14. а) В. Гейзенберг, Введение в единую полевую теорию элементарных частиц, М., «Мир» (1968). б) М. А. Марков, Ann. of Phys. 59, 111 (1970); Препринты Д2-4534, Е2-5271, Р2-5289 ОЯИ, Дубна (1969, 1970).
15. а) Б. Римап, О гипотезах, лежащих в основе геометрии, Сочинения, М.—Л., ОГИЗ (1948), стр. 279. б) А. Эйнштейн, Собрание научных трудов, т. II, М., «Наука», 1966, стр. 88.
16. Д. А. Киржниц, В. А. Чечин, Ядерная физика 4, 431 (1968).
17. а) H. Snyder, Phys. Rev. 71, 38 (1947). б) И. Е. Тамм, Вест. АН СССР, № 9, 22 (1968); Proc. of the Intern. Conf. on Elementary Particles, Kyoto (1965), стр. 314. в) Д. И. Блохинцев, Пространство и время в микромире, М., «Наука», 1970.

\*) Настоящая статья, вероятно, сильно выиграла бы, если бы была снабжена тщательно подобранной библиографией. Автор ограничился, однако, лишь сравнительно небольшим списком литературы, содержащим в ряде случаев, возможно, не лучшие, но лишь попавшиеся на глаза источники (тем не менее предпочтение отдавалось обзорам и другим статьям, содержащим возможно более обширную библиографию).



18. а) Е. Л. Фейнберг, УФН 86, 733 (1965). б) В. Л. Гинзбург, Эйнштейновский сборник 1967, М., «Наука» (1967), стр. 80; *Astronautica Acta* 12, 136 (1970). в) Е. Л. Фейнберг, УФН (1971). г) И. Л. Розенталь, УФН 94, 91 (1968). д) М. А. Марков, Нейтрино, М., «Наука», 1964; И. М. Железных, УФН 89, 513 (1966); см. также ссылку<sup>28</sup> г.
19. а) Л. Б. Окунь, УФН 89, 603 (1966); 95, 402 (1968). б) Проблемы нарушения  $CP$ -инвариантности, УФН 95 (3), 401 (1968).
20. В. Л. Гинзбург, УФН 80, 207 (1963).
21. а) В. Л. Гинзбург, УФН 59, 11 (1956); см. также ссылку<sup>18б</sup>. б) В. Б. Брагинский, В. Н. Руденко, УФН 100, 393 (1970). в) R. H. Dicke, *Astrophys. J.* 159, 1 (1970). г) И. Шапиро, УФН 99, 319 (1969). д) G. A. Seielstad, R. A. Sramek, K. W. Weiler, *Phys. Rev. Lett.* 24, 1373 (1970); D. O. Muhleman, R. D. Ekers, E. V. Fomalont, *Phys. Rev. Lett.* 24, 1377 (1970). е) K. S. Thorne, C. M. Will, *Comments on Astrophys. and Space Phys.* 2, 35 (1970).
22. а) Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц, Теория поля, М., «Наука», 1967. б) А. Эйнштейн, Собрание научных трудов, т. I, М., «Наука», 1965, стр. 631. в) J. Weber, *Phys. Rev. Letters* 22, 1320 (1969); 24, 276 (1970); 25, 180 (1970). г) В. Б. Брагинский, Я. Б. Зельдович, В. Н. Руденко, Письма ЖЭТФ 10, 437 (1969); Препринт № 56, ИИМ АН СССР (1969).
23. В. Л. Гинзбург, Современная астрофизика (научно-популярные статьи). М., «Наука», 1970.
24. а) А. А. Фридман, УФН 80, 439, 447 (1963). б) Я. Б. Зельдович, И. Д. Новиков, Релятивистская астрофизика, М., «Наука», 1967. в) Я. Б. Зельдович, УФН 95, 209 (1968). г) Е. М. Лифшиц, И. М. Халатников, УФН 102 (3), 403 (1970). д) Дж. А. Уилер, Предвидение Эйнштейна, М., «Мир», 1970. е) В. Л. Гинзбург, Д. А. Киржниц, А. А. Любушин, ЖЭТФ 60, № 2 (1970). ж) В. А. Березин, М. А. Марков, Теор. и матем. физика 3, 161 (1970).
25. а) J. Jeans, *Astronomy and Cosmogony*. Cambridge, Cambridge University Press, 1928, p. 352. б) В. А. Амбарцумян, The Structure and Evolution of Galaxies. (Proc. 13 Solvay Conference on Physics). New York, Intersci. Publ. (1965), стр. 1. в) В. А. Амбарцумян, В. В. Казютинский, «Природа», № 4, 16 (1970). г) D. Lynden-Bell, *Nature* 223, 690 (1969). д) Д. Бербидж, М. Бербидж, Квазары, М., «Мир», 1969. е) В. Л. Гинзбург, Л. М. Озерной, *Comments on Astrophysics and Space Physics* (в печати). ж) Л. М. Озерной, Г. Б. Чибисов, *Астрон. ж.* 47, 769 (1970). з) G. Burbidge, *Comments on Astrophys. and Space Phys.* 2, 144 (1970).
26. а) W. Baade, F. Zwicky, *Proc. Nat. Acad. Sci. Amer.* 20, 259 (1934). б) Л. Д. Ландау, ДАН 17, 301 (1937); Собрание трудов, т. I, М., «Наука», 1969, стр. 224. в) A. G. W. Cameron, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* 8, 179 (1970). г) Э. Хьюиш, УФН 97, 715 (1969); УФН 103 (2), (1971). д) В. Л. Гинзбург, УФН 103 (2), (1971).
27. а) В. Л. Гинзбург, С. И. Сыроватский, Происхождение космических лучей, М., Изд-во АН СССР, 1963; УФН 84, 201 (1964); 88, 485 (1966). б) Proc. 11th International Conf. on Cosmic Rays. Budapest, 1969. в) В. Л. Гинзбург, *Comments on Astrophys. and Space Phys.* 1, 207 (1969); 2, 1, 43 (1970). г) Л. И. Дорман, Л. И. Мирошниченко, Солнечные космические лучи, М., «Наука», 1968. д) K. Vescheh, G. R. Burbidge, *Comment on Astrophys. and Space Phys.* 2, 75 (1970). е) О. Ф. Прилудский и И. Л. Розенталь, Препринт ИКИ (1970).
28. а) Дж. Бакал, УФН 101, 739 (1970). б) Нейтрино (сборник статей). М., «Наука», 1970. в) Я. Б. Зельдович, *Comments on Astrophys. and Space Phys.* 2, 12 (1970). г) А. В. Вульфендейл, УФН 103, вып. 4 (1971).